

# UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

*École doctorale des Sciences et de l'Environnement (ED 413)*  
*Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES), UMR 7063*  
*& Sociétés, acteurs, gouvernement en Europe (SAGE), UMR 7363*

Thèse présentée par :

**Lou WEIDENFELD**

Soutenue le : **21 octobre 2025**

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline Sciences de la Terre et de l'Environnement,

Spécialité Sciences de l'Environnement,

## **Engager la transformation d'un agro-hydrosystème en combinant prospective, participation et simulation : mise au point d'une méthode générique à partir du cas du bassin versant de la Souffel (Bas-Rhin)**

**THÈSE dirigée par :**

**PAYRAUDEAU Sylvain**  
**BARBIER Rémi**  
**FERNANDEZ Sara**

Professeur, ENGEES, Strasbourg  
Professeur, ENGEES, Strasbourg  
Chercheuse HDR, ICPEF, INRAE, Toulouse

**RAPPORTEURS :**

**BARRETEAU Olivier**  
**DURAND Patrick**

Directeur de recherche, IGPEF, INRAE, Montpellier  
Directeur de recherche, INRAE, Rennes

**AUTRES MEMBRES DU JURY :**

**LUMBROSO Sarah**  
**ALLAIN Sandrine**  
**PITREL Marina**

Chercheuse, AScA, Paris  
Chercheuse, INRAE, Grenoble  
Chargée de mission, AERM, Metz



## Résumé étendu

L'objectif de cette thèse, financée par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, est de définir une approche et des méthodes permettant d'engager une trajectoire de transformation d'un agro-système, visant l'amélioration de l'état des masses d'eau et sous contrainte de changement climatique. Le travail s'appuie sur le cas du bassin versant de la Souffel ( $115 \text{ km}^2$ ), situé à proximité de Strasbourg (Bas-Rhin, France) sur lequel un travail transdisciplinaire a été initié depuis 2017. Pour cela, le recours à la modélisation agro-hydrologique a été couplé à un exercice de prospective participative à l'horizon 2070, sous contrainte de frugalité, c'est-à-dire sans développement de nouveaux outils scientifiques ni sollicitation excessive des acteurs concernés.

La méthode déployée consistait dans un premier temps à mener un exercice de prospective participative avec les acteurs du territoire afin de co-construire des images du futur répondant à des critères d'adaptation au changement climatique. Ces images ont ensuite été traduites et quantifiées à l'aide des modèles permettant de représenter les effets du changement climatique à l'échelle locale (de la parcelle au bassin versant) et de comparer les différents futurs élaborés avec les acteurs. Les modèles MAELIA et SWAT+ ont été mobilisés conjointement afin d'obtenir une caractérisation biogéochimique du socio-agro-hydrosystème et de croiser leurs résultats, notamment en ce qui concerne les ordres de grandeur des concentrations d'azote. Deux panels d'acteurs ont été constitués pour conduire la démarche participative : (i) les agriculteurs du bassin, et (ii) les représentants de l'action publique locale (syndicat d'eau, collectivités, chambre d'agriculture). Un protocole identique a été appliqué à chaque panel, comprenant deux ateliers.

Le premier atelier avait pour objectif de construire une vision partagée des principaux risques pesant sur le bassin versant, en particulier ceux liés au climat. Le second visait à élaborer plusieurs scénarios prospectifs à l'horizon 2070, en s'appuyant sur quatre critères normatifs préalablement définis : une agriculture résiliente face au changement climatique, moins polluante qu'en 2022 (pesticides, engrains, etc.), économiquement viable et professionnellement attractive. Ces critères offrent une pluralité d'interprétations et de déclinaisons, permettant de générer plusieurs scénarios. Ces derniers ont fait l'objet d'une modélisation, puis ont été présentés et discutés lors d'un troisième et dernier atelier regroupant les deux panels.

La méthodologie mise en œuvre est synthétisée dans la Figure 1, qui présente les différentes approches disciplinaires mobilisées ainsi que les blocs méthodologiques travaillés dans le cadre de la thèse. Les interactions entre ces blocs y sont également représentées. Les blocs méthodologiques particulièrement concernés par la contrainte de frugalité sont signalés en rose. Chacun d'entre eux fait l'objet d'une description synthétique dans le présent résumé.

La première brique méthodologique concerne la caractérisation du site d'étude, ici le bassin versant de la Souffel, à travers une analyse du socio-agro-hydrosystème. Cela a notamment permis de distinguer les spécificités locales des éléments plus génériques qui participent à la caractérisation d'un territoire, dans la perspective de transposer la méthode à un autre

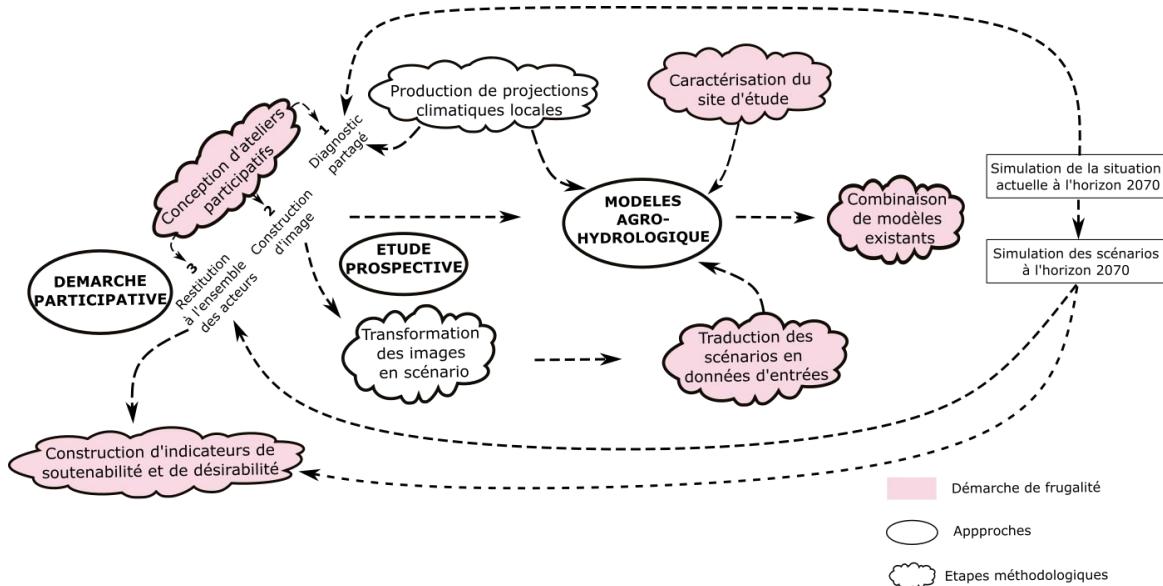


Figure 1. Présentation des blocs méthodologiques du projet de thèse et de leurs interactions.

territoire à enjeux similaires. La thèse a permis d'interroger la pertinence d'une analyse des spécificités territoriales dans le cadre de cette méthode, ainsi que les types de savoirs qu'elle génère, en particulier les savoirs mobilisables pour engager le dialogue avec les acteurs locaux et renforcer la légitimité de la démarche à leurs yeux (itinéraires techniques locaux, filières existantes, etc.). Pour offrir une vue d'ensemble, bien que partielle, du territoire, quelques éléments-clés sont présentés ci-dessous. La Souffel est une rivière de plaine, située dans un bassin versant du Bas-Rhin (115 km<sup>2</sup>) : elle a un régime pluvial, ce qui se traduit par des épisodes d'étiages sévères en été où le débit est alors largement constitué de rejets des stations d'épuration situées à l'aval, l'approvisionnement en eau potable se faisant à partir de l'aquifère rhénan. Les principaux systèmes de production relèvent de la polyculture (grandes cultures principalement : maïs et blé) - élevage (bovin, avicole et porcin), et marginalement de cultures spéciales et de maraîchage. L'agriculture y est pratiquée de manière intensive et à l'aide d'une mécanisation généralisée. Depuis 30 ans, le bassin versant de la Souffel fait l'objet de politiques d'accompagnement au changement de pratiques agricoles pour améliorer la qualité physico-chimique de l'eau de la rivière, sans résultat significatif. Les concentrations en pesticides et en nitrates dans les masses d'eau concernées restent en effet très élevées.

Après avoir produit ce premier diagnostic étendu du territoire, la deuxième brique méthodologique portait sur la production de projections climatiques à l'échelle locale, en questionnant la capacité des modèles climatiques à fournir des données robustes à cette échelle. La comparaison entre données climatiques observées jusqu'en 2022 et données prédictives par les modèles climatiques depuis 1959 soulève plusieurs enjeux. Elle interroge d'abord la pertinence même de cette comparaison, bien qu'il s'agisse ici principalement d'une évaluation des tendances générales. En l'occurrence, dans la mesure où ces modèles climatiques ont été mobilisés, cette comparaison permet de mettre en évidence les biais à souligner à l'échelle locale de la maille présente sur la Souffel, en fonction des variables utilisées. L'analyse des données a montré une augmentation généralisée des températures moyennes sur l'ensemble des mois de l'année à l'horizon 2070 par rapport au présent et la robustesse de la modélisation de cette variable. On observe également une augmentation de l'ordre de 10 % du cumul des précipitations d'ici 2070, mais dont la répartition intra-annuelle

est défavorable à l'agriculture du territoire et ce d'autant plus qu'elle est associée à une hausse de l'évapotranspiration (risque de stress hydrique). En effet, si le cumul de précipitations automnales et printanières augmente, celui des précipitations estivales diminue. Enfin, la dernière décennie a vu une intensification des événements climatiques extrêmes. Or, ceux-ci sont en partie lissés par les modèles climatiques et leur pas de temps journalier, ce qui met en lumière quels biais doivent être pris en compte lors de la modélisation agro-hydrologique.

Ces deux briques méthodologiques (Figure 1), associées à la modélisation des données agro-hydrologiques actuelles du territoire sous forçage climatique à l'horizon 2070, fournissent une base de savoirs qui permet de concevoir et d'animer le premier atelier participatif. Centré sur un diagnostic partagé des enjeux climatiques, cet atelier a initié le dialogue avec les acteurs locaux, en utilisant le changement climatique comme levier potentiel de transformation des pratiques vers une gestion plus durable des ressources. L'atelier a porté en particulier sur la manière dont les données climatiques étaient perçues, comprises et discutées par les acteurs du territoire. Il visait à répondre à une double question : (1) le changement climatique constitue-t-il un levier mobilisateur pour les acteurs locaux, notamment les agriculteurs ? (2) Les pratiques d'adaptation déjà engagées contribuent-elles à une gestion plus durable des ressources, notamment de l'eau ? Les premiers résultats ont permis de répondre favorablement à la première question : les acteurs, en particulier agricoles, sont fortement confrontés aux effets du changement climatique, ce qui a facilité la mobilisation d'un large éventail de parties prenantes. La seconde question reste plus discutée. Si certaines adaptations individuelles semblent cohérentes avec une logique de résilience (choix d'espèces moins consommatrices d'eau, ajustement des itinéraires techniques, gestion plus écologique des sols), les projets collectifs, eux, sont centrés sur le stockage de l'eau et l'agrandissement des exploitations, sans réelle visée environnementale. Ce point a donc dû être explicitement abordé dans l'atelier de production des images du territoire à l'horizon 2070.

Pour le deuxième atelier, dont l'objectif était précisément de co-construire des images, qui représentent la dimension synchronique du territoire à l'horizon 2070, la sélection des participants est restée identique à celle du premier : l'ensemble des personnes cibles initialement ont été conviées, y compris celles absentes lors de la première session. Cet atelier cherchait à faire dialoguer les différentes parties prenantes autour des notions de désirabilité et de soutenabilité, en particulier à travers le prisme des pratiques agricoles. Les participants ont été accompagnés dans la construction des images à travers plusieurs étapes. D'abord, les critères normatifs proposés (i.e. une agriculture moins polluante, plus résiliente face au changement climatique, économiquement viable et attractive professionnellement) ont servi de support à la discussion. Ils ont été discutés collectivement afin d'en construire une définition partagée. Ils devaient être envisagés dans le cadre d'une projection à l'horizon 2070, impliquant des évolutions profondes, notamment en matière de viabilité économique et d'attractivité professionnelle, fortement dépendantes des futurs envisagés. Les futurs construits par les participants ont ensuite été enrichis par des caractéristiques techniques de l'agro-hydrosystème (taille des exploitations, origines et apports en nutriments, irrigation) et en contextualisant dans les grandes lignes l'image (quelles créations de filières ou de débouchés, quelles politiques publiques, quelle gestion de la ressource en eau...). Les participants ont enfin été invités à préciser les conditions de faisabilité nécessaires à la concrétisation de ces visions à l'horizon 2070. L'objectif global était d'accompagner la

formulation de dires d'acteurs à propos des trajectoires de transition agricole, suffisamment détaillés pour pouvoir être traduits en variables mobilisables dans la phase de modélisation agro-hydrologique. Quatre images ont ainsi pu être créées lors de ces ateliers : Agriculture standardisée de firme, Agriculture duale de modèles agricoles spatialisés, Agriculture biologique et technologique et Agroécologie à visée d'autonomie locale.

À la suite de cet atelier, les dires d'acteurs ont été transformés en images robustes et cohérentes. Une méthodologie a ainsi été déployée pour passer des dires recueillis lors de l'atelier à des récits structurés, puis à des données mobilisables pour la modélisation. Ce travail visait à répondre à la question de recherche suivante : dans le cadre d'une prospective participative, quelle méthodologie permet de produire une traduction fidèle, cohérente et robuste des dires d'acteurs en récits, puis en données d'entrée pour les modèles agro-hydrologiques ? Par rapport aux démarches couramment pratiquées, l'objectif est de renforcer la traçabilité de la construction des scénarios, à partir non seulement des dires d'acteurs, mais aussi d'apports issus de différentes méthodologies de fabrication de récits et de leur traduction en variables compatibles avec les exigences de la modélisation.

Le bloc méthodologique suivant consiste à modéliser les différentes images co-construites lors du deuxième atelier. Cette phase, relativement longue, s'est déroulée en plusieurs étapes. Elle a d'abord impliqué la stabilisation des données d'entrée, susceptibles d'évoluer en fonction du développement continu du modèle MAELIA, qui est un modèle de recherche en constante évolution, et de l'affinement de la compréhension des systèmes simulés. Ce travail préparatoire a permis de développer une modélisation complète du bassin versant avec SWAT+, reposant sur les mêmes données en entrée, et qui offre la possibilité de simuler le transport réactif des pesticides, ce que ne permet pas encore MAELIA. Une phase de calibration et de validation a ensuite été menée à partir des données existantes. Le processus a été itératif : certains résultats incohérents ont nécessité une réévaluation, impliquant parfois des ajustements des données d'entrée, notamment des itinéraires techniques agricoles. Les quatre images ont ainsi été modélisées à l'aide des modèles agro-hydrologiques, sous forçage climatique. Plusieurs indicateurs ont été extraits pour faciliter la lecture et l'appropriation des résultats par les acteurs, en lien avec les critères normatifs définis : rendements agricoles (résilience), lixiviation d'azote et lessivage de pesticides (pollution), ainsi que temps de travail (désirabilité professionnelle).

Enfin, le dernier atelier, co-organisé avec l'Agence de l'eau et le syndicat local de l'eau, dans le cadre du CTEC (Contrat Territoire Eau et Climat, financé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse), a permis de présenter les images construites, les récits associés et les résultats des simulations à l'ensemble des participants. Ces éléments ont été discutés par les panels sous l'angle de leur soutenabilité, en tenant compte de leur capacité d'adaptation aux changements globaux (rendement, pression sur les ressources, etc.) et de leur désirabilité, notamment au regard de l'évolution du métier d'agriculteur et des attentes sociétales. La discussion collective a permis d'identifier les éléments jugés désirables, viables, ou au contraire problématiques. Dans un second temps, les participants ont été invités à réfléchir à des actions concrètes à court terme (2 à 5 ans), en cohérence avec les récits jugés soutenables. L'organisation conjointe de l'atelier a permis de formuler des propositions d'action susceptibles d'être financées par l'Agence de l'eau (e.g. conversion à l'agriculture biologique, gestion paysagère, développement de filières spécifiques, etc.) donnant ainsi une portée opérationnelle au travail prospectif.

La méthodologie développée dans cette thèse a permis de mobiliser les acteurs locaux du territoire de la Souffel et de co-construire des trajectoires agro-hydrologiques variées, intégrées à différentes visions de gestion environnementale. Elle montre l'intérêt d'utiliser le changement climatique comme levier de transformation des pratiques dans des démarches participatives à l'échelle locale. Une approche innovante a été mise en place qui repose sur la traduction des dires d'acteurs en récits, puis en données d'entrée pour les modèles agro-hydrologiques. La thèse interroge également l'usage et les limites des modèles complexes dans les démarches prospectives, notamment lorsqu'il s'agit d'intégrer des représentations du futur fondées sur des logiques sensiblement différentes de celles mobilisées habituellement. L'expérimentation d'une démarche de frugalité, encore peu courante en recherche, a partiellement fonctionné : elle a favorisé l'implication locale mais s'est avérée difficile à articuler avec le travail de traduction des dires d'acteurs pour créer des images robustes et cohérentes du territoire à l'horizon 2070 et a été très limité vis-à-vis de l'utilisation, de l'implémentation, du calibrage des outils complexes de modélisation agro-hydrologique. Enfin, plusieurs pistes mériteraient d'être explorées, notamment le développement de modèles agro-hydrologiques plus compatibles avec des travaux de prospective participative. Un travail plus approfondi sur les dynamiques de gouvernance locale et sur les effets concrets de l'intégration des résultats de la modélisation dans les processus décisionnels permettrait de consolider l'opérationnalité des démarches participatives en contexte d'adaptation au changement climatique.

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse ainsi que la Région Grand-Est pour avoir financé cette thèse. Un remerciement particulier à Marina Pitrel, qui a suivi et accompagné l'évolution de ce travail à travers le comité de suivi, participé activement aux ateliers et qui me fait aujourd'hui l'honneur de siéger dans le jury.

Merci à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de relire et d'évaluer ce travail.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à mes encadrants pour leur présence, leur soutien et la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ces années. Merci de m'avoir donné une liberté totale sur ce projet, tout en restant toujours disponibles pour interroger, enrichir et nourrir ma réflexion. Sylvain, ta présence quotidienne, ton soutien sans faille, ta gentillesse, ta curiosité et ton intégrité ont été des repères précieux, aussi bien dans ma vie quotidienne que dans l'élaboration de ce manuscrit. Rémi, merci d'avoir nourri sans relâche nos discussions, en questionnant mes certitudes, en pointant du doigt les zones d'ombre ou d'angle mort, et en m'incitant à explorer de nouvelles écoles de pensée et de nouveaux horizons. Merci aussi pour ta curiosité distante et ta disponibilité, que j'aurais sans doute dû solliciter davantage. Sara, merci d'avoir contribué activement à ce travail, de m'avoir guidée dans l'univers de la prospective et d'y avoir insufflé tant de réflexions et de discussions enrichissantes. Merci également pour ta générosité, ton humour et ta combativité, que j'admire sincèrement. À vous trois, enfin, merci de vous être lancés dans ce projet interdisciplinaire, qui a parfois dû être exigeant à encadrer en raison même de cette richesse.

Un grand merci à Benoît Labbouz, qui a accepté de rejoindre l'aventure. Merci pour ton implication dans la préparation et l'animation des ateliers, ton écoute attentive et tes conseils précieux.

Je remercie également chaleureusement toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu échanger et qui ont contribué à faire avancer ce projet scientifique, en particulier l'équipe MAELIA : Olivier Théron, Jean Villerd, Manon Dardonville, Nirina Ratsimba, Sébastien Bodin et Renaud Misslin. Merci aussi à Paul Van Dijk pour nos échanges stimulants, l'apport de données, ta participation aux ateliers et ta bienveillance. Je suis également reconnaissante à Anne Schaub pour ses éclairages techniques sur les pratiques agronomiques. Merci à Maxime Madouas pour nos discussions sur les approches participatives et l'animation d'ateliers, qui m'ont beaucoup aidée. Merci aussi à Raphaël Di Chiara pour ton aide précieuse dans les moments où rien ne marchait. Enfin, merci à Fabien pour les instants partagés à Strasbourg, ton regard toujours pertinent sur le travail des autres, ainsi qu'à mes premiers encadrants, Josette, Gilles et Irina, qui m'ont transmis l'envie de poursuivre dans la recherche.

Je souhaite également remercier tous les étudiants avec lesquels j'ai travaillé pendant leurs stages. Leurs contributions et nos discussions ont fait progresser cette thèse à bien des égards : Nicolas Delaunay, Romane Sillard, Gaétan Pénin et Manon Picot.

Merci à tous les participants aux ateliers, qui ont accepté d'y prendre part avec intérêt et engagement, ainsi qu'à ceux qui ont contribué en amont à travers des entretiens, guidant mes choix et mes orientations.

A great thought goes to all my different officemates with whom I had the chance to share daily life during this PhD: Lùlù, Tobi, for your true kindness and integrity; Felix, for your unfailing optimism and faith in the future; and Jakob, my “husband at work” and cooking partner. I also warmly thank the rest of the band: Sara and Danni, what a pleasure it has been to share so many adventures with you, whether in the mountains or by the sea. Je voudrais aussi remercier Hugo et Juliette, à Strasbourg comme à Toulouse, pour tous ces moments passés ensemble, ainsi que Rémi, Luc, Hugo R., Véro et Eymeric avec qui on s'est bien mariés pendant les manifestations (entre autres). Merci enfin à toutes celles et ceux qui ont rythmé mon quotidien et adouci mes journées pendant plus de trois ans : Véronique, Adrien, Céline, Joachim, Mérédith, Christine, Christophe, Marie-Claire, Jérémy... Un merci particulier aux « nouveaux » arrivants, Guillaume et Adrien, pour leur énergie, leur positivité et leur implication dans les projets collectifs. Une pensée spéciale pour Charles, même si nous nous sommes rencontrés tardivement, quelle belle rencontre et merci d'être de ceux qui doutent. A very, very special thank you to my wonderful friend Agata, who brightens the days and makes me laugh even when everything feels dark.

Merci à Alicia, la meilleure coloc du siècle, aux copains strasbourgeois pour les soirées et week-ends partagés, aux voisins du 12 pour nos discussions toujours revigorantes, à Vincent pour les échanges du jeudi soir qui me redonnaient de l'élan, et aux amis parisiens d'avoir bravé le « grand nord » pour venir réchauffer mon cœur, même si vous êtes venus au printemps et en été. Merci aussi aux doctorants de l'Arsenal pour leur accueil si chaleureux en salle des chercheurs, qui m'a permis de me sentir intégrée immédiatement, et pour toutes les discussions passionnantes que nous avons partagées, en particulier Marine, Ali, Paul, Marie-Amélie, Nassim et Alice.

Je voudrais remercier mes parents, qui ont contribué à faire de moi une personne curieuse et têtue, des qualités qui m'ont été précieuses durant ces quatre années. Merci à ma mère pour son soutien constant, ainsi qu'à toute ma famille, toujours présente (ou absente) selon mes besoins, en particulier Patricia, Emma, Louis, Ella et Katia. Merci également à Rémi, Léo et Jojo pour votre accueil chaleureux dans la ville rose et tous ces chouettes moments passés ensemble.

Enfin, mes derniers remerciements vont à Oscar, pour ton soutien indéfectible, ta gentillesse à toute épreuve et ta sensibilité au monde, mais aussi tes relectures acharnées, tes conseils avisés, ta compassion quand je n'en pouvais plus. Quelle chance de t'avoir dans ma vie.

# Table des matières

<b>Résumé étendu .....</b>	i
<b>Remerciements .....</b>	vi
<b>Table des matières.....</b>	viii
<b>Liste des figures .....</b>	xii
<b>Liste des tableaux .....</b>	xvi
<b>Liste des abréviations .....</b>	xvii
<b>Introduction générale .....</b>	1
1.    Pression agricole sur la ressource en eau .....	1
1.1    Pressions agricoles sur la ressource en eau .....	1
1.2    Régulation de l'usage et de la dégradation des masses d'eau par les politiques publiques	2
1.3    Des politiques publiques qui ne suffisent plus à répondre aux enjeux environnementaux	5
1.4    Les leviers à mobiliser issus de la littérature.....	8
1.5    Une première problématique scientifique de la thèse .....	9
2.    Explicitation des partis pris sur lesquels reposent l'approche .....	10
2.1    Hypothèse de travail à l'échelle locale.....	10
2.2    Aborder la préservation de la ressource en eau via le prisme du changement climatique....	12
2.3    Le choix d'une démarche « frugale » .....	14
3.    Une approche interdisciplinaire et transdisciplinaire .....	15
Originalité du projet de thèse dans la famille des approches couplant prospective, participation et modélisation.....	15
4.    Organisation du manuscrit .....	18
Références.....	19
<b>Chapitre 1 : Construire la démarche de prospective engageante.....</b>	23
1.    Le recours à la prospective.....	23
1.1    Historique du champ disciplinaire de la prospective .....	24
1.2    Choix de la prospective et ce que cela produit .....	24
1.3    Justification du choix de l'horizon .....	28
1.4    Explicitation des critères normatifs.....	30
1.5    Application du principe de frugalité .....	33
2.    Le mode de participation choisi .....	34
2.1    Historique de l'intégration de la participation dans les dispositifs d'action publique.....	34
2.2    Enjeux méthodologiques et portée de la participation dans cette thèse.....	35
2.3    Choix de la méthodologie participative.....	39
2.4    Constitution des panels .....	42
2.5    Application du parti pris de frugalité.....	44
3.    Des modèles agro-hydrologiques pour accompagner la prospective .....	44

3.1 L'émergence de la modélisation intégrée .....	45
3.2 Intégrer la modélisation à la prospective et aux exercices participatifs .....	47
3.3 Les besoins pour la modélisation agro-hydrologique .....	50
3.4 Sélection des modèles agro-hydrologiques MAELIA et SWAT .....	53
3.5 Application du principe de frugalité .....	58
4. Présentation de la méthode générique.....	58
4.1 Caractérisation de l'agro-hydrosystème .....	59
4.2 Premier atelier : atteindre un diagnostic partagé sur les effets du changement climatique 61	
4.3 Deuxième atelier : construction d'images du territoire en 2070 .....	62
4.4 Transformation des dires d'acteurs en image.....	62
4.5 Simulation des jeux de données.....	63
4.6 Troisième atelier : présentation des récits et mise en pratique du changement à court terme 63	
Références.....	65
<b>Chapitre 2 : Caractériser l'agro-hydrosystème étudié .....</b>	<b>73</b>
1. Diagnostic agro-territorial .....	74
1.1 Caractérisation des sols et du climat.....	74
1.2 Diagnostic agraire historique .....	78
1.3 Systèmes agricoles et cultures produites aujourd'hui .....	83
1.4 La pression foncière urbaine en milieu agricole.....	86
2. Etat de la ressource en eau .....	88
2.1 Etat de la ressource en eau .....	88
2.2 Gestion des usages de l'eau et de la pollution agricole .....	92
3. Les acteurs du territoire .....	94
3.1 Acteurs présents sur le territoire .....	94
3.2 Mobilisation des participants .....	97
Conclusion .....	99
Références.....	100
<b>Chapitre 3 : Produire un diagnostic partagé sur la question climatique .....</b>	<b>103</b>
1. Produire une projection climatique à l'échelle locale.....	104
1.1 Présentation générale des données.....	105
1.2 Approche méthodologique adoptée .....	110
1.3 Application au cas d'étude de la Souffel .....	111
1.4 Conclusion sur les données climatiques locales.....	117
2. Perception du changement climatique par les participants .....	119
2.1 Cadre conceptuel et méthodologie.....	119
2.2 Organisation de l'atelier .....	122

2.3 Résultats de l'atelier .....	126
2.4 Discussion et perspective .....	133
Conclusion .....	139
Références.....	141
<b>Chapitre 4 : Des dires d'acteurs aux données d'entrée de modèles : traçabilité et cohérence des scénarios qualitatifs et quantitatifs dans un exercice de prospective participative.....</b>	<b>147</b>
Introduction du chapitre .....	147
Abstract .....	149
1. Introduction.....	149
2. Materials and methods .....	152
2.1 Case study area.....	152
2.2 Image-building workshop proceedings .....	153
2.3     Description of the model inputs.....	154
2.4     Production of the variables analysis agro-hydrologic foresight grid.....	155
3. Methodology for bridging statements/narratives to storylines following.....	155
3.1 From statements to a consistent story .....	155
3.2 Structural framework approach for strengthening scenario consistency.....	163
3.3 Result: final storyline .....	166
4. Methodology for translating storylines into inputs data for an agro-hydrological model .....	166
4.1 Bridging modelling constraints and frame effects .....	168
4.2 Linking the storyline and model constraints to a spatial representation .....	170
4.3 Results .....	172
5. Discussion and insights.....	172
5.1 Striking a balance between fidelity and consistency.....	172
5.2 Setting boundaries: defining the scope of socio-political-economic in scenario development	
173	
5.3 Bridging qualitative storylines and quantitative inputs data .....	174
6. Conclusion .....	175
Bibliography.....	176
Conclusion du chapitre.....	181
Références.....	189
<b>Chapitre 5 : Modélisation agro-hydrologique dans une étude prospective : résultats, discussion et perspectives.....</b>	<b>191</b>
1. Rappels et compléments méthodologiques.....	192
1.1     Données d'entrée des modèles.....	192
1.2     Calibration des modèles agro-hydrologiques.....	201
2. Présentation des résultats.....	203
2.1     Période actuelle.....	203
2.2     Les simulations des quatre images de la Souffel (2065-2075) .....	209

2.3	Satisfaction hydrique et azotée .....	220
3.	Discussion .....	221
3.1	Usage d'un modèle conceptuel dans un exercice de prospective .....	221
3.2	Respect des critères normatifs imposés pour la construction des images .....	225
	Conclusion .....	229
	Références.....	231
<b>Chapitre 6 : Perception et appropriation des images par les acteurs</b>	.....	235
1.	Déroulé de l'atelier .....	235
2.	Résultats .....	236
2.1	Réception des images par les participants .....	237
2.2	Les propositions à court terme des participants.....	240
3.	Discussion et perspectives à l'échelle locale .....	242
3.1	La réception des images .....	242
3.2	Le type de mesure proposé .....	243
3.3	Hypothèses d'engagement des acteurs par la méthodologie.....	246
	Conclusion .....	247
	Références.....	249
<b>Conclusion générale</b> .....	.....	251
1.	Principaux résultats .....	251
1.1	Synthèse des éléments de réponses aux questions de recherche basées sur les partis pris	
	251	
1.2	Retours sur l'expérience d'une démarche interdisciplinaire en sciences de la durabilité	
	255	
1.3	Conclusions sur la générnicité de cette méthode .....	256
2.	Ressentis personnels sur cette thèse et son aboutissement .....	256
3.	Perspectives.....	258
3.1	Pistes d'amélioration.....	258
3.2	Adapter la méthodologie aux contraintes locales.....	259
3.3	Mise en situation .....	262
	Références.....	263
<b>Annexes</b> .....	.....	a
<b>Résumé</b> .....	.....	11

## Liste des figures

**NB : Les figures sans citation ont été réalisées personnellement.**

Figure 1. Présentation des blocs méthodologiques du projet de thèse et de leurs interactions. ....	ii
Figure 2. Schéma simplifié des politiques publiques de l'eau : des directives européennes à leurs traductions à l'échelle du bassin versant. ....	3
Figure 3. Principales sources de dégradation des eaux de surface européenne (2018) ; Statut chimique des eaux superficielles en Europe (2015) (D'après le rapport sur le financement de la DCE Commission européenne, 2021). ....	5
Figure 4. Nombre de captages fermés par année en France pour des raisons de dépassement de seuils de polluants, (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022). ....	6
Figure 5. Processus d'élaboration du plan d'intégration des objectifs du développement durable développés par les Nations Unies au niveau local, d'après Szetey et al., 2021. ....	11
Figure 6. Panoplie de prospectives rangées en fonction de participants mobilisé et de la complexité de l'outil de modélisation utilisé, les encadrés en rouge représentent les méthodes qui nous intéressent particulièrement (Popper, 2008).....	16
Figure 7. Augmentation des températures des différents scénarios RCP au 21 <sup>ème</sup> siècle (IPCC, 2023). ....	29
Figure 8. Classification des discours les plus fréquents qui constituent un frein au changement de pratiques agricoles (inspiré de Lamb et al., 2020). ....	39
Figure 9. Différents acteurs identifiés liés à l'agro-hydrosystème.....	42
Figure 10. Ensemble de variables du model WORLD, développé par le club de Rome (Meadows et al., 1972).....	45
Figure 11. SPM.6 présentant les différentes trajectoires possibles en fonction de l'intensité du forçage radiatif issue du sixième rapport du GIEC, 2023. ....	46
Figure 12. Différentes composantes de la modélisation proposées. Les composantes entourées en rouge sont celles qui sont utilisées dans le cadre du projet (d'après Voinov et al., 2016). ....	48
Figure 13. Représentation des différents compartiments environnementaux et des flux en fonction de leur importance dans le cycle du carbone (à gauche) et dans le cycle de l'azote (à droite). ....	51
Figure 14. Représentation des différents compartiments environnementaux et des flux dans le cycle de l'eau naturel, Université de Walkato.....	52
Figure 15. Processus régissant les flux d'eau dans le sol représentés dans le module agricole du modèle MAELIA. ....	54
Figure 16. Processus régissant les flux d'azote et de carbone dans le sol représentés dans le module agricole du modèle MAELIA. ....	55
Figure 17. Paramètres régissant la croissance des cultures et leur rendement dans le module agricole du modèle MAELIA (en orange les données d'entrées, en noir les paramètres internes au modèle et en rouge les données de sortie). ....	57
Figure 18. Présentation des principales étapes de la méthodologie d'accompagnement des acteurs locaux vers un changement de pratique plus soutenable. ....	59
Figure 19. Exemple de données d'entrées des modèles agro-hydrologiques utilisés. ....	61
Figure 20. Localisation du bassin versant de la Souffel et illustration d'une portion renaturée proche de Stutzheim.....	74
Figure 21. Occupation du sol du territoire. ....	75
Figure 22. Carte des sols et spécification de leurs caractéristiques sur le territoire de la Souffel (Source CRAGE) .....	76
Figure 23. Diagramme ombrothermique de comparaison de la moyenne mensuelle de la température et de la somme des mensuelle des précipitations moyennées sur dix ans pour les deux périodes (1950-1960) et (2010-2020), basé sur les données de la station météo d'Entzheim (MétéoFrance)..	78

Figure 24. Présentation des villages de la communauté de communes du Kochersberg.....	80
Figure 25. Evolution des surfaces agricoles occupées par les cultures majoritaires du territoire de la Souffel au cours du temps (RPG, 2006-2020) .....	84
Figure 26. Evolution temporelle du territoire villageois de Pfulgriesheim/Griesheim/Dingsheim de 1860 à 2015 – source (PLUi de la CoCoKo) (Legrand, 2020). .....	86
Figure 27. Carte de l'évolution des zones urbaines et des forêts entre 1956 et 2018 (Nicolas Delaunay, stage de M1 en géographie physique encadré en 2021). ....	87
Figure 28. La Souffel et ses affluents, ainsi que les équipements de mesure présents sur le territoire. ....	89
Figure 29. Localisation de la nappe sur le territoire de la Souffel. La profondeur varie de moins de 5 m (clair) à 20 m (foncé). (APRONA). ....	90
Figure 30. Somme des pesticides quantifiés mensuellement par l'AERM à l'aval de la Souffel, Mundolsheim (Payraudeau & Imfeld, 2021). ....	90
Figure 31. Evolution des concentrations en nitrate à l'amont de la rivière (en violet) et à l'aval (à Mundolsheim) entre 2013 et 2022 (Données de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).....	91
Figure 32. Frise chronologique des études, diagnostics, opérations et projets portés sur le territoire depuis 1999 .....	92
Figure 33. Identification des narratifs Explore 2 (scénarios RCP 8.5) par représentation des écarts de précipitation et de température à la fin du siècle par rapport à la période 1976-2005 sur l'ensemble du territoire Français (Marson et al., 2024). .....	108
Figure 34. Cascade des incertitudes en modélisation climatique liée à la descente d'échelle, produite par Eric Sauquet. ....	109
Figure 35. Localisation du bassin versant de la Souffel, des mailles DRIAS/SAFRAN qui y sont disponibles et des stations météo les plus proches.....	112
Figure 36. Évolution des précipitations moyennes annuelles et mensuelles des données Météo France et SAFRAN à Entzheim (1959-2021, à gauche) et à Brumath (1975-2021, à droite).....	113
Figure 37. Précipitation moyenne cumulée mensuelle de SAFRAN (bleu) et des modèles climatiques (noir) sur la maille SAFRAN/Météo France d'Entzheim sur la période 1959-2005.....	114
Figure 38. Evolution des températures moyennes annuelles (à gauche) et mensuelles (à droite) calculées à partir des données journalières de la station météo Entzheim et sur celles de la maille SAFRAN sur la période 1959-2021. ....	115
Figure 39. Comparaison des précipitations cumulées en fonction de l'intensité des pluies journalières des données de station météo et de la maille SAFRAN (classées par ordre croissant) : à gauche pour Entzheim (01/08/1958 - 31/12/2021), à droite pour Brumath (01/01/1975 - 31/12/2021). ....	116
Figure 40. Intensité journalière des précipitations en 1999 pour la station météo d'Entzheim et SAFRAN : à gauche avec toutes les données, à droite sans les précipitations nulles. ....	117
Figure 41. Distribution de Gumbel entre données simulées (SAFRAN) et observées de Météo France à Entzheim sur la période historique (1958-2021) (en haut) et entre les modèles climatiques (EURO-CORDEX) et observées simulées (SAFRAN) sur la période historique (1950-2005) (en bas). ....	118
Figure 42. Moyenne mobile sur les valeurs des températures journalières issues de la station météo d'Entzheim entre 1948 et 2021 (moyenne glissante lissée toutes les 10 ans). ....	124
Figure 43. Diagramme ombrothermique comparant les moyennes mensuelles des données observées à la station d'Entzheim (MétéoFrance) entre les décennies 1950-1960 et 2010-2020 des températures (° C) en rouge et du cumul de précipitation (mm) en bleu.124 <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure 44. Comparaison des moyennes de température mensuelles entre deux périodes à partir de données observées (1950-1960 ; 2015-2022) et l'horizon 2070 à partir des modèles climatiques EXPLORE 2 (1965-1975). ....	125
Figure 45. Location of the Souffel catchment area (France). ....	153
Figure 46. Example of a map of the region in 2070, filled in by stakeholders during the workshop (original content translated into English). ....	156
Figure 47. Self-positioning of the image in relation to the initial criteria. ....	164

Figure 48. Evolution of spatialisation between the actual territory representation (left: from RPG-Graphical Parcel Register and regional land use database, 2020) through image of the territory in 2070 (right).....	172
Figure 49. Auto-positionnement des images en fonction des critères normatifs initialement donnés aux participants.....	181
Figure 50. Spatialisation du territoire en 2070 de l'image agriculture standardisée de firme.....	182
Figure 51. Spatialisation du territoire en 2070 de l'image agriculture duale de modèles agricoles spatialisés.....	183
Figure 52. Spatialisation du territoire en 2070 de l'image agriculture biologique et technologique.	185
Figure 53. Caractéristiques des narratifs Explore 2 (scénarios RCP 8.5) en termes d'écart de précipitation et de température maximale sur la période 2065-2075 par rapport à la période 2015-2023 sur la maille centrale de la Souffel.	193
Figure 54. Itinéraires techniques des trois principales cultures présentes sur le territoire, utilisés pour l'implémentation des données d'entrées des modèles SWAT+ et MAELIA.....	196
Figure 55. Système de culture et itinéraires techniques des cultures principales implémentées pour simuler l'image Agriculture de firme (ICNAF : CIPAN, ILUC : CIVE).	196
Figure 56. Système de culture et itinéraires techniques des cultures principales implémentées pour simuler l'image Agriculture duale de modèles spatialisés (ICNAF : CIPAN).	197
Figure 57. Système de culture et itinéraires techniques des cultures principales implémentées pour simuler l'image Agriculture autonome agroécologique (ICNAF : CIPAN).	198
Figure 58. Système de culture et itinéraires techniques des cultures principales implémentées pour simuler l'image Agriculture biologique et technologique (ICNAF : CIPAN).	199
Figure 59. Systèmes de culture et itinéraires techniques de la culture de pomme de terre.....	201
Figure 60. Diagramme en boîte des résultats de simulation des modèles MAELIA (en bleu) et SWAT+ (en rouge) issu des simulations sur les différentes cultures sur la période 2016-2023 (Aucune HRU ne présente la betterave à sucre comme culture majoritaire, expliquant l'absence de rendement pour cette culture dans SWAT+).	204
Figure 61. Lixiviation d'azote sous la zone racinaire moyen annuel par culture en fonction des années modélisées par MAELIA.....	205
Figure 62. Charge de nitrates simulée par SWAT+ (en orange) et observée au pas de temps menseul (AERM, en bleue) entre 2019 et 2023 dans la Souffel à Mundolsheim, France (Picot, 2024).	206
Figure 63. Charge simulée par SWAT+ (en bleue) et observée (campagne ITES, en orange) de S-metolachlor et période d'application pour les cultures de betterave et de maïs et en 2019 dans la Souffel à Mundolsheim, France, (Picot, 2024).	207
Figure 64. Hydrogramme représentant les différents flux (débits simulés et observés, rejet de STEP et précipitation) après le processus de validation de SWAT+ sur l'année 2023, (Picot, 2024).	208
Figure 65. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture de firme.	209
Figure 66. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture de firme.	211
Figure 67. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par SWAT+ selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture duale de modèles spatialisés.	212
Figure 68. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture duale de modèles spatialisés.	213
Figure 69. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture autonome agroécologique.	215

Figure 70. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture autonome agroécologique.....	216
Figure 71. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture biologique et technologique. ....	217
Figure 72. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture biologique et technologique. ....	218
Figure 73. Comparaison des rendements de pomme de terre, selon les différentes images et scénarios climatiques, simulés par MAELIA sur la période 2065-2075 .....	219
Figure 74. Satisfaction hydrique (en haut) et azotée (en bas) du maïs des différentes images simulées par MAELIA sur les périodes 2065-2074. ....	220
Figure 75. Récapitulatif des différentes étapes de travail de la thèse, des tâches associées à chaque étape et des alternatives possibles selon les contextes (les éléments en italique dans les cadres bleus représentent les composantes incontournables de la méthode) .....	261

## Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison de différentes méthodes de prospectives basée sur des critères de construction de scénario, de modélisation et de publics impliqués (✓ symbolise oui ; X symbolise non). ....	17
Tableau 2. Présentation des objectifs normatifs et des modifications structurelles envisagées de prospectives agro-environnementales envisageant des modifications structurelles importantes.....	32
Tableau 3. Caractéristiques principales vis-à-vis de la participation des principales méthodes de participation. ....	40
Tableau 4. Présentation des différents particularités et représentations agro-hydrologiques disponibles dans les modèles SWAT et MAELIA (✓ : représentation des processus ; X : pas de représentation des processus ; ~ : représentation partielle des processus). ....	53
Tableau 5. Indicateurs clés extraits des récits et des simulations des jeux de données permettant d'évaluer le respect des critères normatifs imposés pour la création des images.....	63
Tableau 6. Rendements moyens en conditions classiques et en conditions de sécheresses sur le territoire de la Souffel (Chambre d'agriculture d'Alsace de 2008 à 2020) .....	85
Tableau 7. Evolution des prix des terres agricoles et constructibles entre 1968 et 1983 .....	87
Tableau 8. Participation par panel et par atelier.....	99
Tableau 9. Présentation des données climatiques et météorologiques disponibles à l'échelle locale. ....	105
Table 10. Main data required to use the agricultural module of MAELIA. ....	154
Table 11 : Table of literature-based categories (Col. 1) and participant-defined variables (Col. 2), with modelling variables in bold and other stakeholder inputs in black (UAA = Utilised Agricultural Area), illustrated here following the same example.....	158
Table 12. Examples of agronomic implementation based on stakeholder image based on academic literature, experts and local literature. ....	167
Table 13. Examples of agronomic implementation choice and their translation in MAELIA model existing variables. ....	169
Table 14. Examples of spatial translation operated based on stakeholders' discourses (literal translation of quotations from French to English). ....	171
Tableau 15. Critères de différentiation des quatre images co-construites.....	186
Tableau 16. Comparaison des images Trajectoire(s) et des scénarios ADEME selon les composantes clés de l'agrosystème .....	187
Tableau 17. Variables de sortie présentées des modèles agro-hydrologiques MAELIA et SWAT+ dans cette étude. ....	192
Tableau 18. Paramètres du module sol requis dans MAELIA et SWAT+. ....	194
Tableau 19. Indicateurs évaluant la robustesse de la simulation après validation (2023), (Picot, 2024). ....	208
Tableau 20. Pourcentage de changement des charges de nitrate à l'exutoire simulées par SWAT+ en fonction des différentes images co-construites avec les acteurs entre 2068 et 2075, (Picot, 2024). ....	211
Tableau 21. Taux d'exportation du S-métolachlore dans la Souffel pour les différentes images selon les quatre scénarios climatiques C1 à C4 entre 2068 et 2075, simulé par SWAT+ (Picot, 2024).....	212
Tableau 22. Validation des critères normatifs selon les résultats de modélisation pour chaque image ( <b>X</b> : non, <b>X</b> : non mais, ✓ : oui). ....	228
Tableau 23. Catégorisation des mesures proposées par les participants et évaluation de celles-ci en fonction du contexte local.....	244

## Liste des abréviations

- AERM** : Agence de l'Eau Rhin Meuse  
**DCE** : Directive Cadre sur l'Eau  
**CRAGE** : Chambre d'Agriculture Grand Est  
**FDSEA** : Fédération Départementale des Syndicats Exploitants Agricoles  
**IAM** : Integrated Assessment Modelling  
**PAC** : Politique Agricole Commune  
**PCAET** : Plan Climat-Air-Energie Territorial  
**SAGE** : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux  
**SRADDET** : Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires



## Introduction générale

### 1. Pression agricole sur la ressource en eau

#### 1.1 Pressions agricoles sur la ressource en eau

Les masses d'eau douce sont le reflet des activités anthropiques et de la structuration de nos modes de vie. On y retrouve des polluants d'origine anthropique très diverses : activité industrielle (POPs et métaux lourds), agricole (nitrates, phosphore et pesticides), minière (acides, métaux lourds), domestique (micro-organismes, médicaments dont les antibiotiques) à des concentrations plus ou moins acceptables selon les organismes considérés et selon les normes fixées pour chaque État ou groupement d'États. Ces seuils de concentration, qui varient selon chaque polluant, sont conçus pour alerter les services publics et les populations en cas de dépassement, afin de préserver les écosystèmes et la santé humaine. Ces seuils sont néanmoins dépassés de manière récurrente, entraînant par exemple la fermeture de 12600 captages d'eau potable entre 1980 et 2021 en France, principalement pour des motifs de dégradation de la qualité de la ressource ([Ministère du développement durable, 2022](#)). Ce travail se concentre sur les polluants agricoles que sont les nitrates et les pesticides, qui perturbent fortement les systèmes aquatiques ([Moss, 2008](#)) et les cycles biogéochimiques ([Persson et al., 2022](#)). Ces usages agricoles représentent un risque majeur quant à la préservation des conditions d'habitabilité de la planète ([Persson et al., 2022](#)). Malgré les différentes alertes, encore de nombreuses molécules, parfois nouvellement arrivées sur le marché, sont retrouvées. En 2023, l'ANSES ([ANSES, 2023](#)) publie un nouveau rapport sur les résultats issus de la campagne de mesure sur les pesticides et leurs métabolites qui a entraîné la fermeture de captage d'eau potable sur l'ensemble du territoire dans les eaux souterraines, mettant en cause par exemple le métolachlore ESA dans plus de 50 % des eaux analysées, dont 34 % dépassent le seuil de 0,9 µg/L.

De manière générale, l'état qualitatif des masses d'eau douce représente une des problématiques majeures du 21ème siècle ([Schwarzenbach et al., 2010](#) ; [Wang-Erlundsson et al., 2022](#)). Il s'agit d'un problème global qui touche l'ensemble des rivières et des nappes du monde ([Wilkinson et al., 2021](#) ; [Yang et al., 2021](#)). Les problématiques qualitatives posées par les activités agricoles sont mises à l'agenda politique en France à partir de la fin des années 1970 où les premières alertes concernant les nitrates sont dressées, notamment en Bretagne, où les algues vertes commencent à proliférer. Durant plusieurs décennies, les faits scientifiques s'accumulent, menant à un consensus sur l'augmentation de la pollution liée au transfert des intrants agricoles dans les sols, les eaux superficielles et les nappes. Ce consensus se matérialise en politique, où les agriculteurs sont désignés comme des pollueurs, notamment par l'ancien ministre de l'environnement, Brice Lalonde. De plus, la pollution diffuse agricole devient très visible car les secteurs urbains et industriels à l'origine très polluants sont délocalisés. Ceux qui restent ont des obligations très fortes de traiter leurs eaux usées, tout comme les rejets des eaux urbaines, ce qui a pour effet une disparition progressive de ces pollutions ([Billen et al., 2007](#)) et une mise en évidence des pollutions d'origine agricole.

L'agriculture est également une activité qui consomme de l'eau par évapotranspiration, composée d'« eau verte » (eau dans la zone non saturée du sol, formée par les précipitations et disponible pour les plantes) et aussi « d'eau bleue », c'est-à-dire d'eau prélevée dans les rivières ou les nappes lorsque les cultures sont irriguées ([Falkenmark & Rockström, 2005](#)). L'irrigation représente environ 70 % des prélèvements d'eau douce dans le monde ([AQUASTAT, 2020](#) ; [Rosegrant et al., 2009](#)). La pression sur les hydrosystèmes est déjà extrêmement forte aujourd'hui ([Wang-Erlansson et al., 2022](#)) et menace de s'amplifier avec les effets du changement climatique et plus spécifiquement avec la hausse de la température et la modification des régimes saisonniers de pluies, si les systèmes agricoles ne changent pas ([de Faria & Wicheins, 2010](#) ; [Wang-Erlansson et al., 2022](#)). Les dégradations de la qualité de l'eau par les activités agricoles font pourtant l'objet de nombreuses réglementations, à différentes échelles : européennes, nationales et locales.

## 1.2 Régulation de l'usage et de la dégradation des masses d'eau par les politiques publiques

### *Les effets des pratiques agricoles conventionnelles sur le système environnemental*

Les usages agricoles ont donc des effets directs sur l'hydrosystème qui sont liés au système de production agricole intensif et à l'usage des sols. **L'agriculture intensive** est un mode de production agricole visant à maximiser l'efficacité des facteurs de production (fertilisation des sols, pesticides, engins agricoles...) dans le but d'augmenter le rendement. La dégradation des sols agricoles liée à la mécanisation, à leurs usages intensifs et à des pratiques agronomiques qui laissent les sols nus a des effets sur les capacités de stockage de l'eau dans le sol ([Morgan, 2020](#)). Cela a pour résultat d'augmenter les besoins en irrigation des cultures ([Rosegrant et al., 2009](#)) qui conduit à des pratiques de plus en plus répandues visant à stocker de grands volumes d'eau, ce qui a pour effet de perturber le cycle de l'eau. A cela s'ajoutent des choix d'espèces qui ne sont pas adaptés aux variables climatiques locales et nécessitent d'intensifier l'irrigation. En ce qui concerne la dégradation de la qualité de l'eau, l'agriculture intensive est dépendante de produits particuliers comme (i) de fertilisants qui apportent des nutriments en concentration élevée aux plantes afin de stimuler leur développement, (ii) les pesticides comme les fongicides et insecticides qui diminuent grandement le risque d'attaque de champignons et d'insectes, les herbicides qui évitent toute compétition avec d'autres plantes appelées adventices. La dégradation des sols a également des conséquences sur la qualité de l'eau, car le phénomène d'érosion accentue le lessivage de molécules dans les cours d'eau ([Morgan, 2020](#)). De manière générale, les dynamiques d'évolution de l'occupation du sol et du cycle de l'eau sont imbriquées et les pratiques agricoles conventionnelles visant à supprimer les éléments de paysages tels que les haies et les talus afin de mécaniser les pratiques ont des effets directs sur l'augmentation du lessivage des molécules apportées au sol et de l'érosion qui détériorent la qualité de l'eau.

### *Les politiques publiques et dispositifs d'action utilisés*

La ressource en eau fait l'objet de nombreuses politiques publiques à différentes échelles. Plusieurs facettes de cette ressource sont concernées (qualité de l'eau, suivi morphologique, risque d'inondation...), notamment celles liées à la question des usages et de la dégradation de l'eau par les activités agricoles, comme des régulations concernant les pesticides et les engrains (Figure 2).

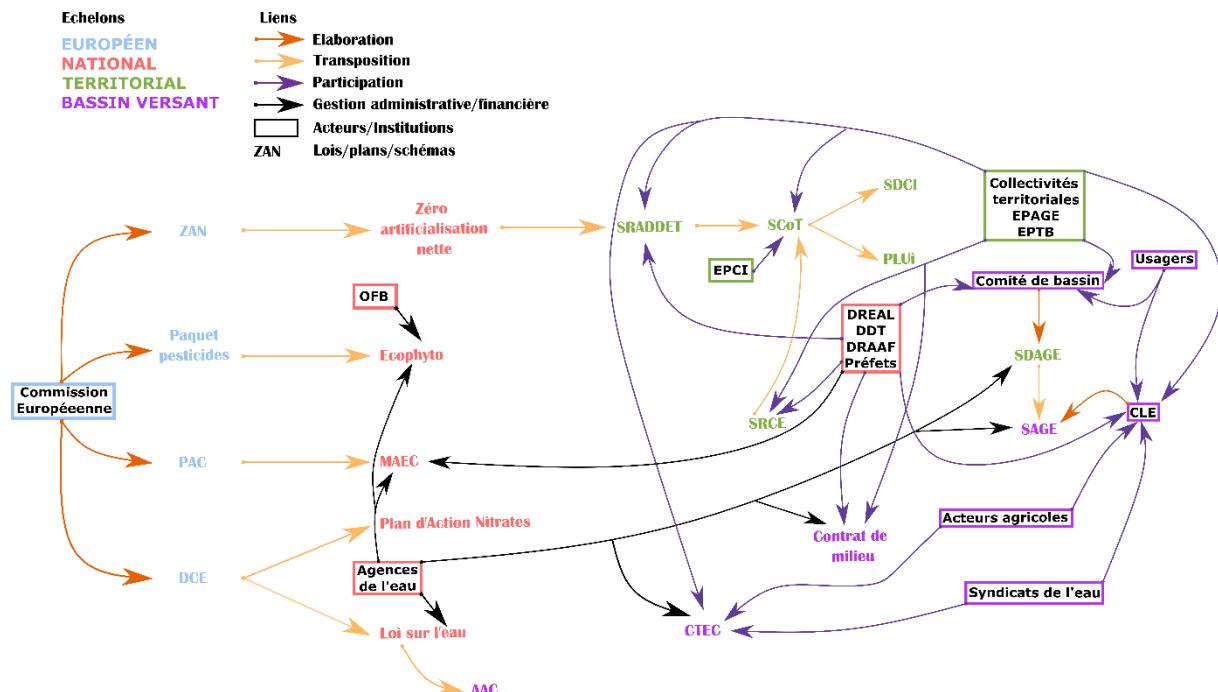


Figure 2. Schéma simplifié des politiques publiques de l'eau : des directives européennes à leurs traductions à l'échelle du bassin versant.

La gouvernance européenne oriente les politiques publiques agro-environnementales nationales qui sont ensuite territorialisées, d'abord au niveau national, puis à des niveaux plus locaux, par le biais de lois, plans ou schémas d'action. Les instruments de l'action publique mis en place au niveau local ont tendance à être davantage concertés entre les collectivités locales et une pluralité d'autres acteurs environnementaux, associatifs, agricoles ou usagers, depuis plusieurs années. Les établissements publics (Agences de l'eau, OFB...) sont souvent porteurs et financeurs de ces concertations. La multiplication du nombre de mesures réglementaires qui se concentrent sur un aspect environnemental particulier est une limite à une gestion globale et intégrée de l'eau en plus de rendre le fonctionnement politique inintelligible ([Tainter, 2006](#) ; [Cour des comptes, 2019](#)).

Les dispositifs d'action des politiques agro-environnementales, c'est-à-dire de l'ensemble des mesures instaurées par les pouvoirs publics pour encourager l'évolution des pratiques agricoles vers des usages plus soutenables, reposent sur plusieurs formes d'instruments pouvant être associées :

- **La réglementation** : l'eau étant un objet extrêmement régulé, notamment depuis la loi sur l'eau de 1964. La réglementation agro-environnementale sur la qualité de l'eau est encadrée par la directive nitrate, adoptée en 1991 et la directive pesticide adoptée en 2009 par le Parlement européen.

- **Les incitations économiques** à but environnemental : par exemple, des aides financières publiques pour mettre aux normes des infrastructures dans le cas du Programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole (PMPOA). Ces incitations se sont parfois transformées en primes d'éco-conditionnalisation, notamment dans les aides du premier pilier de la PAC.

- De la **sensibilisation** à des pratiques vertueuses et de l'*accompagnement* à des changements de pratiques qui reposent sur des actions volontaires : par exemple les politiques de

verdissement qui sont des ajustements techniques particuliers présentés comme des avancées significatives (*Deverre & Sainte Marie, 2008*) et qui ne sont pas obligatoires. Ces politiques de verdissement s'opposent à des politiques d'écologisation qui supposent des changements structurels profonds et mènent à de nouveaux systèmes agro-alimentaires (*Lamine, 2011*).

- Le financement de **campagnes de mesures** afin d'accumuler des connaissances techniques spécifiques aux questions agro-environnementales et un suivi comptable des pollutions sur sites (*Zakeossian et al., 2017*) : par exemple chaque agence de l'eau dédie une partie de son budget à la surveillance des milieux aquatiques (31,3 millions sur les 1,1 milliards d'euros pour l'Agence Rhin Meuse sur leur 11<sup>ème</sup> programme de 2019 à 2024 pour surveiller l'ensemble des pollutions d'origine anthropique, dont une grande partie de pollution d'origine agricole).
- La **concertation** entre une multitude de parties prenantes (élus, administration, agriculteurs, citoyens, acteurs privés, association...) (*Warin, 1993*) : par exemple dans l'élaboration collective d'un schéma directeur d'action. Les politiques de l'eau en France sont largement territorialisées et gérées suivant le mode de **gestion intégrée** qui vise à rassembler un ensemble d'acteurs ayant des intérêts différents et à s'accorder sur une vision partagée d'un mode de gestion particulier. La question de la gestion d'une ressource, par exemple de l'eau dans un bassin versant, est traitée collectivement afin de préserver la ressource et le plus grand nombre d'intérêts représentés (*Hassenforder et al., 2020*).

#### *Les limites de ces dispositifs d'action*

Ces dispositifs d'action se heurtent à de multiples stratégies d'évitement (*Bureau-Point et al., 2021*). C'est par exemple le cas des dispositifs qui se basent sur une participation volontaire, de type Ferti'mieux, visant pourtant à répondre à une obligation réglementaire de diminution du lessivage des nitrates (*Nicourt & Girault, 2002*). En effet, le fonctionnement basé sur du volontariat alloue aux acteurs agricoles un grand pouvoir de négociation sur l'orientation des mesures car le volontariat repose sur de l'acceptabilité sociale (*Busca, 2003*). Pour les mêmes raisons d'acceptabilité, les exercices de concertation manquant de rigueur dans la définition et le maintien des objectifs environnementaux conduisent à des situations peu efficaces sur le plan écologique (*Salles, 2006*). Par exemple, les acteurs participant à la concertation peuvent modifier les objectifs environnementaux initiaux en fonction de leurs intérêts propres (syndicats, filières agricoles...) afin de les orienter vers des objectifs de « gains effectifs pour l'activité agricole » du fait de l'espace laissé aux négociations (*Busca, 2003*). Enfin, la plupart des programmes d'action sont des ajustements à la marge, c'est-à-dire qu'ils se concentrent sur certains paramètres spécifiques (diminution de la dose d'intrant, modification d'un paramètre d'un itinéraire technique) sans soutenir une refonte systémique des pratiques.

On peut également se poser la question du modèle associé aux usages de l'eau et de la manière dont il est instruit. En effet l'eau est aujourd'hui considérée, notamment par une partie du milieu agricole comme une ressource associée à l'extractivisme, qui doit être stockée et dont l'usage est associé à une valeur économique. Néanmoins, la ressource en eau est vitale, elle doit donc être gérée d'une manière différente et être intégrée dans une gestion environnementale.

## 1.3 Des politiques publiques qui ne suffisent plus à répondre aux enjeux environnementaux

### *Des politiques coûteuses aux résultats insuffisants*

L'efficacité environnementale se mesure à la capacité de projets agro-environnementaux à atteindre les objectifs environnementaux qu'ils ont eux-mêmes fixés. Malgré des politiques environnementales existantes et couteuses (par exemple, 16,1 milliards d'euros en 2019 en France pour lutter contre les pollutions des eaux superficielles et souterraines, hors eaux marines ([Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022](#)), les résultats environnementaux sont peu encourageants (Figure 3).

L'ensemble des eaux superficielles – mais également dans une moindre mesure des eaux souterraines – des pays européens est touché par une contamination chimique des eaux. Seulement 33 % des rivières superficielles européennes ont atteint le seuil de « bon état chimique » alors que la DCE est en vigueur depuis 2000 (Figure 3). Les altérations les plus importantes sont les pollutions chimiques et morphologiques (Figure 3). Le rapport de la Commission européenne sur l'évaluation de la DCE pointe des stratégies financières peu productives car non orientées vers les objectifs de la DCE.

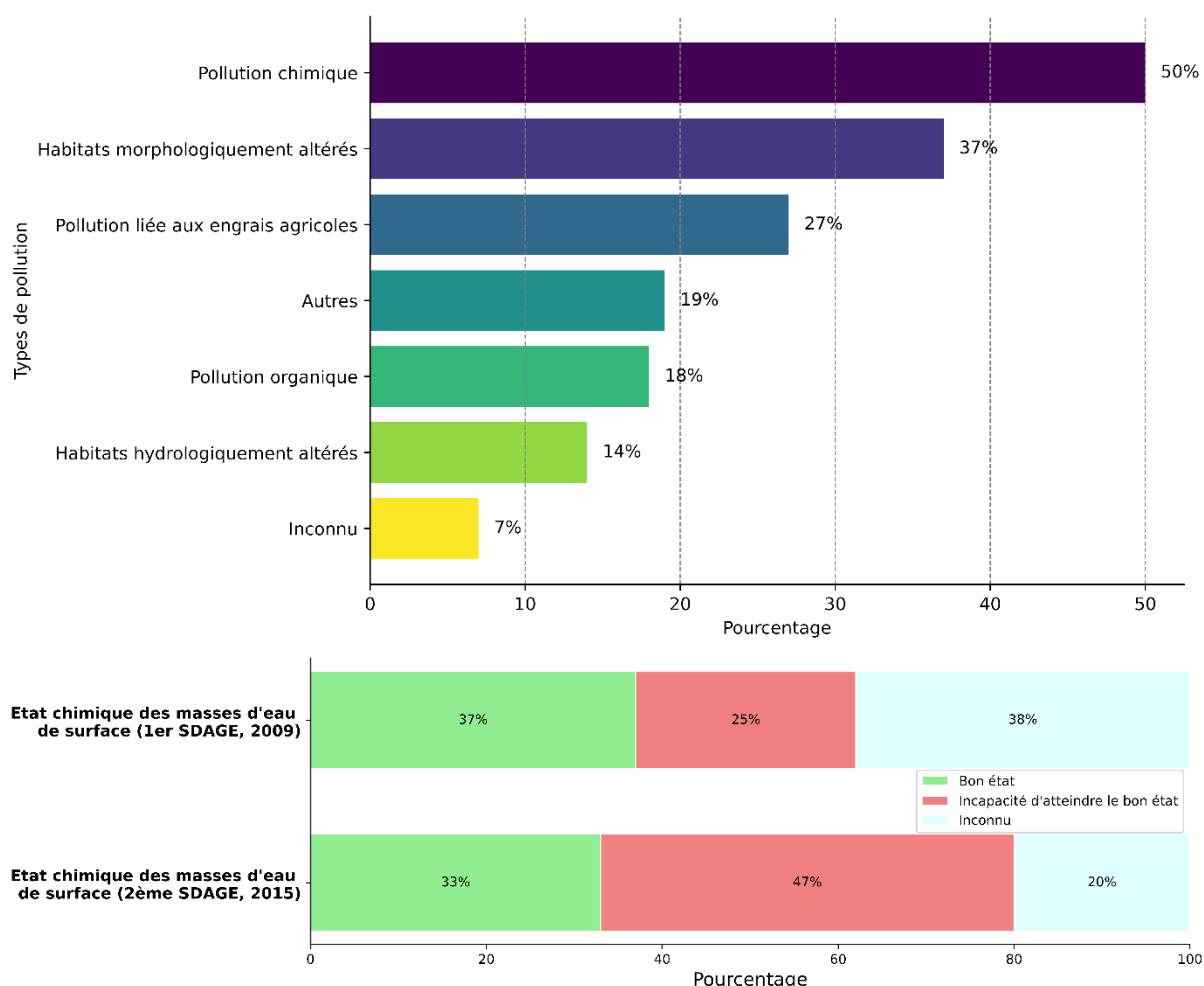


Figure 3. Principales sources de dégradation des eaux de surface européenne (2018) ; Statut chimique des eaux superficielles en Europe (2015) (D'après le rapport sur le financement de la DCE [Commission européenne, 2021](#)).

On peut citer par exemple l'absence de financement visant à limiter les altérations morphologiques ou les pollutions chimiques mais également une mauvaise coordination entre les grandes politiques européennes sectorielles, notamment la PAC et la DCE ([Commission européenne, 2021](#)).

En France, malgré la hausse constante des dépenses allouées à la lutte contre les pollutions des eaux (de 9,4 milliards en 2000 à 16,1 milliards en 2019), le nombre de captages fermés pour cause de dépassement des seuils qualitatifs fixés par la DCE est toujours autour de 60 en 2022 (Figure 4, [Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022](#)). Les dépenses sont principalement allouées à l'assainissement des eaux usées (en moyenne 90 % du budget, puis à la surveillance des pollutions et à leur prévention (6 %) et enfin à la dépollution de sites pollués (4 %) ([Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022](#)).

De nombreux captages sont fermés chaque année en France, un phénomène qui s'est intensifié depuis les années 1990, en raison à la fois des effets des politiques agricoles intensives et de l'amélioration du réseau météorologique (Figure 4). La mise en place de la DCE dans les années 2000 a pour effet une diminution des valeurs seuils et la prise en compte de davantage de paramètres. Bien que le nombre de captages fermés soit élevé, on observe tout de même une légère diminution de leur nombre depuis 2014, avec en moyenne sur la période 2014-2022 une fermeture de 72 captages par an pour cause de dépassement de seuils sur les paramètres nitrates et pesticides, microbiologiques et autres paramètres qualitatifs (Figure 4). De manière générale, la stratégie d'action des états européens depuis la mise en place de la DCE concernant la protection des cours d'eau n'a pas permis d'endiguer les pollutions dans ces milieux, excepté dans des cas particuliers ([Barataud et al., 2014](#)). L'activité agricole exerce une pression polluante toujours actuelle, dont l'encadrement est inopérant, face aux résultats non significatifs des politiques de lutte contre les pollutions des eaux mises en place ([Zakeossian et al., 2017](#)).

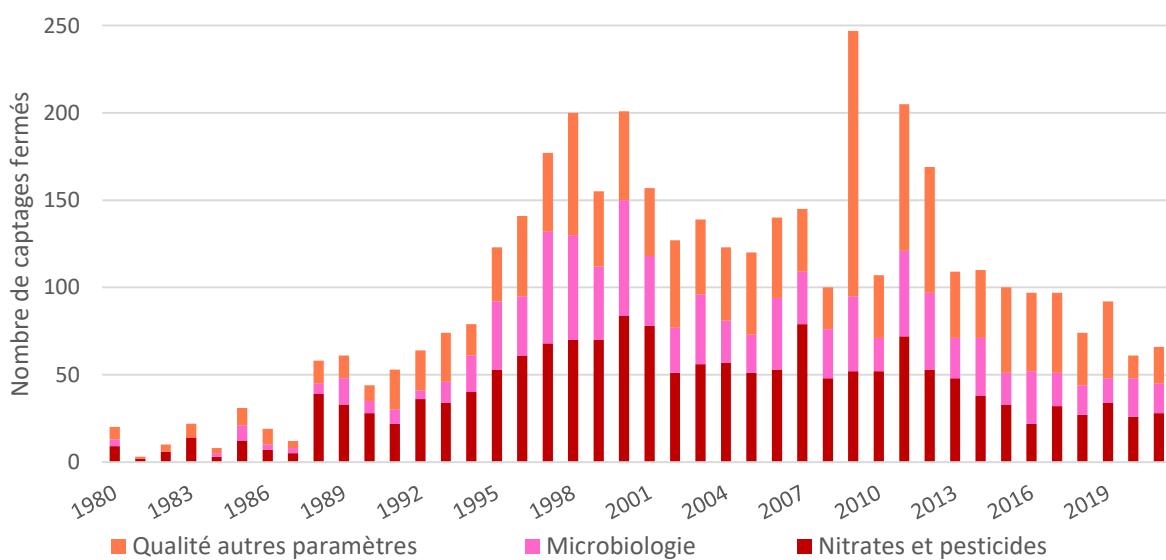


Figure 4. Nombre de captages fermés par année en France pour des raisons de dépassement de seuils de polluants, ([Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022](#)).

Lorsque la situation est urgente et qu'il est essentiel de fonder l'action sur une efficacité environnementale, les changements structurels sont alors envisagés ([Zakeossian et al., 2017](#)). Les actions misent en place par le biais des politiques publiques agro-environnementales sont utiles lorsque la problématique est contextualisée et réfléchie en termes systémiques. Le problème des pollutions d'origine agricole est un problème difficilement solvable car de nombreux acteurs sont impliqués, ayant chacun des intérêts et des freins au changement de différents ordres.

#### *Un bilan sur les raisons de la limite de l'efficacité des politiques publiques*

Les freins au changement diffèrent en fonction des types de causes. On retrouve d'abord les causes structurelles, puis les causes organisationnelles et enfin les causes individuelles.

- *Causes structurelles* : le **verrouillage sociotechnique** est un frein associé à un système particulier dont l'organisation s'est articulée et développée autour de cadres économiques, sociaux et technologiques particuliers qui entravent le développement d'autres trajectoires ([Baret & Vanloqueren, 2011](#)). Ainsi, l'ensemble des politiques et des outils se développent en fonction de ce cadre et plus en fonction des besoins réels du système. Par exemple, le système agricole actuel se structure autour des conditions du marché et de normes de productivité (rendements, économies d'échelle, achat de matériel onéreux...) qui représentent un frein au changement de pratique et/ou de système. Ce verrouillage sociotechnique ne peut être modifié que par des décisions provenant de l'Etat, notamment d'ordre régulatif et normatif ([Cour des comptes, 2019](#)). Amblard ([2019](#)) souligne un autre facteur d'ordre structurel lié à la caractérisation physique d'un territoire qui peut faire varier la mobilisation sur un territoire : elle prend l'exemple d'une rivière faiblement polluée qui n'incite pas à prendre des mesures environnementales ou d'un bassin versant avec des temps de transfert longs qui ne permettent pas d'observer de résultats significatifs ce qui conduit à un découragement. De la même manière, plus les terres agricoles produisent du rendement, plus il est difficile de mettre en place des mesures de gestion pour la qualité de l'eau ([AESN, 2022](#)).

- *Causes organisationnelles* : les défaillances organisationnelles au sein de la structure de gouvernance et de sa gestion des politiques publiques mènent à des dysfonctionnements importants. Le rapport de la Cour des comptes ([2019](#)), détaille plusieurs raisons d'ordres organisationnelles de l'échec du projet Ecophyto. On y retrouve notamment un nombre excessif de mesures relatives aux pesticides qui existent dans une pluralité d'instruments de programmation différents et qui ne sont pas articulés entre eux. Cela entraîne une diversité de source de financement qui requièrent chacune un temps conséquent dédié à l'administratif pour les acteurs souhaitant changer leurs pratiques. La question de l'accès aux informations est également évoquée dans le rapport, notamment les ressources financières mobilisées par le plan mais aussi « les données et les analyses rendant compte de la politique menée, des substances actives émises et de leurs effets sur la santé humaine et sur l'environnement ». De plus, lorsque le programme d'action se révèle inefficace, comme c'est le cas pour le programme Ecophyto ([Cour des comptes, 2019](#)), les failles du programme ne sont pas répertoriées mais les échéances seulement reculées. Cela implique donc qu'il n'y ait pas de prise en compte suffisante des fonctionnements antérieurs dans la construction de nouveaux programmes. La caractérisation d'un objet environnemental par les outils d'évaluation

existants est fortement limitée car ces systèmes dépendent d'une multitude de paramètres administrés par différentes mesures (*Mermet et al., 2005*).

Il existe également des limites liées au facteur technique, notamment la difficulté d'apporter des connaissances spécifiques à certain territoire (*Amblard, 2019*) qui sont nécessaires pour décider des modifications à effectuer et qui relève souvent de problématiques financières et temporelles.

- *Causes individuelles* : il existe les freins aux changements individuels qui sont multiples, notamment pour les agriculteurs. Les normes liées aux pratiques conventionnelles sont souvent appuyées par les pairs, ou la famille. Ainsi, l'acceptation par les pairs est un facteur important de frein au changement de pratiques (*Rodriguez et al., 2009*).

#### 1.4 Les leviers à mobiliser issus de la littérature

Il semble donc difficile d'agir efficacement dans le cadre des politiques publiques actuelles. Bien qu'une amélioration globale des politiques nationales soit nécessaire, il est également possible de proposer, en parallèle, des stratégies territoriales. Ce travail se concentre donc sur une action locale concertée, adoptant une **approche stratégique**. Celle-ci repose sur l'idée que le changement de système dépend de l'intervention d'acteurs ciblés dans le cadre d'une démarche collective, unissant le système autour d'un objectif commun partagé (*Mermet et al., 2005*). Les leviers identifiés dans la littérature, susceptibles de contribuer à l'élaboration de politiques publiques à long terme sont également pris en compte.

La préservation et la gestion de l'eau relèvent de la gestion de communs. Ainsi, la gouvernance locale de l'eau a une dimension collective forte, en termes économiques (*Amblard, 2019*), mais également en termes participatifs, afin d'impliquer l'ensemble des utilisateurs (*Zekeossian et al., 2017*). L'action collective est grandement favorisée si elle est portée par des « acteurs d'environnement » (*Mermet et al., 2005*) qui sont considérés comme des agents du changement, capables d'affirmer la vision environnementaliste lors de concertations. Il peut également s'agir de parties prenantes ayant des intérêts convergents avec la protection des ressources (*Bouleau, 2009*). Un cadre de gestion de l'eau doit envisager un territoire dans son ensemble à travers l'aménagement du territoire, ce qui tend à être de plus en plus le cas avec les SCoT par exemple. Il ne doit pas se restreindre à tenter d'intégrer les normes environnementales dans les systèmes agricoles préexistants et verrouillés (*Zekeossian et al., 2017*). Cela signifie qu'il faut penser la question de l'eau, de l'environnement, de l'agriculture et de l'aménagement territorial en termes systémiques afin d'aboutir à une véritable gestion intégrée des ressources (*Mermet et al., 2005*). La **gestion intégrée** est une approche visant à coordonner les parties prenantes d'un système, en tenant compte de leurs activités et intérêts variés, afin de prendre des décisions collectives qui favorisent la réduction des conflits et l'utilisation durable des ressources.

De nombreux cas d'étude portés sur la gestion de l'eau face aux pollutions agricoles par les collectivités ont permis de faire émerger certains leviers particulièrement efficaces (*Barataud et al., 2014*) :

(i) Les acteurs agricoles doivent être engagés activement dans les concertations avec les collectivités, dont les objectifs de changement de pratique sont clairement énoncés.

L'engagement d'un médiateur qui assure un dialogue dans la gestion des solutions collectives participe à la fluidité des discussions. En effet, la bonne entente et le niveau de confiance entre les parties prenantes est un facteur supplémentaire d'efficacité sur les projets agro-environnementaux (*Amblard, 2019*). Il est nécessaire d'impliquer des agriculteurs moteurs et reconnus dans la profession (*Barraqué & Viavattene, 2009*), qui sont enclins à entreprendre une transition. Le succès d'une stratégie repose également sur le niveau d'implication des collectivités et sur le choix des outils réglementaires de maîtrise d'œuvre dont l'usage est grandement facilité s'ils relèvent de la compétence des collectivités (*AESN, 2022*).

(ii) Les concertations doivent mener à des décisions concrètes qui soutiennent le changement de pratique, notamment des contrats rémunérés à long terme, et des compensations financières (*AESN, 2022*), par exemple sur la préservation des paysages qui sont co-élaborés avec les agriculteurs. Les cas de gestion et de préservation de l'eau efficient, comme l'exemple de la ville de Augsbourg (*Barataud et al., 2014*) reposent sur des réglementations fortes et contrôlées, mais il existe des contre exemples de réglementations inopérantes (*Amblard, 2019*). Néanmoins, il semble nécessaire d'associer les approches réglementaires et volontaires pour favoriser le bon état de l'eau (*AESN, 2022*).

(iii) Il est important de fournir des connaissances démontrant la nécessité et les avantages apportés par le changement de pratique, ainsi qu'un soutien technique. Ce dernier est d'autant plus utile s'il est offert de manière personnalisée lors de l'accompagnement des agriculteurs dans l'adoption de nouvelles pratiques (*AESN, 2022*). Ce support peut être apporté par des acteurs expérimentés des processus de concertation tels que l'Agence de l'eau ou les comités de bassin (*Amblard, 2019*) ce qui favorise grandement la réussite des projets. Les connaissances requises ne sont pas seulement techniques, mais également focalisées sur les procédures et les compétences d'animation qui aboutissent à la définition d'objectifs précis en discutant et en minimisant les incertitudes potentielles (*Zekeossian et al., 2017*).

Les exercices prospectifs, qui sont également un moyen de concevoir un cadre d'action, peuvent également être évalués au regard de leur capacité à orienter vers des états environnementaux favorables. Le fait de travailler sur des scénarios de rupture qui placent l'environnement au cœur de la gestion politique introduit cet état futur dans l'ensemble des possibles et mène à des décisions environnementalistes à court terme (*Lumbroso et al., 2020*).

## 1.5 Une première problématique scientifique de la thèse

Cette analyse du contexte met en évidence l'efficacité environnementale limitée des mesures agro-environnementales existantes, notamment sur la ressource en eau, en raison de nombreux points de blocage. Cette thèse vise à proposer une méthode innovante et transposable à l'accompagnement et à l'engagement du changement de pratiques agricoles dans le but de diminuer durablement la pression sur la quantité et la qualité des eaux en cherchant à contourner les principaux points de blocage identifiés. Le cadre d'action proposé repose sur une approche prospective à long terme (2070) qui vise à faire se projeter les acteurs agricoles et en charge du développement territorial et de la gestion de l'eau dans des futurs désirables. Afin d'outiller cette projection, les scénarios sont mobilisés pour construire des narratifs désirables, cohérents et robustes, c'est-à-dire que la structure du

**scénario reste fondée et justifiable, même lorsqu'elle fait face à de nouvelles hypothèses imprévues par les auteurs. Ils sont simulés par le biais de modèles agro-hydrologiques pour obtenir des données quantitatives qui caractérisent l'état du système agro-environnemental à long terme. La méthode repose sur trois partis pris qui déterminent son cadre d'action et dont la combinaison est originale. Ces partis pris sont introduits dans la partie suivante ainsi que les sous-questions de recherche qui en résultent.**

## 2. Explicitation des partis pris sur lesquels reposent l'approche

La thèse repose sur des choix de conduite de l'approche, que nous appelons partis pris et qui sont explicités dans cette partie. Ils sont au nombre de trois et seront introduits dans cette partie. Le premier parti pris est celui d'une approche locale. Le postulat juxtaposé est que cette échelle peut dépasser le verrouillage sociotechnique du système agro-environnemental. Le deuxième parti pris consiste à utiliser les effets du changement climatique comme levier aux changements de pratiques agricoles afin de ne pas aborder frontalement la question de l'eau, notamment sa qualité vis-à-vis des nitrates et des pesticides, qui peut ne pas mobiliser suffisamment la profession agricole. Ce parti pris repose sur l'hypothèse que les actions à long terme permettant d'atténuer les effets du changement climatique cooccurrent avec une gestion qualitative et quantitative de l'eau durable et soutenable et qu'ils mobilisent davantage le monde agricole. Enfin, le dernier parti pris, celui de la frugalité de l'approche en termes temporels et économiques, vise à employer des outils existants et à mobiliser le moins possible les acteurs agricoles et institutionnels dans une optique de généralisation de la méthode sur d'autres territoires à enjeux.

### 2.1 Hypothèse de travail à l'échelle locale

L'hypothèse de travail à l'échelle locale repose sur deux justifications. La première concerne l'intégration des spécificités locales, notamment les dynamiques institutionnelles et des acteurs présents sur le territoire, dans les processus globaux (nationaux ou européens). La seconde repose sur l'hypothèse de verrouillage du système agro-environnemental : agir à l'échelle locale est un moyen de contourner la rigidité du système en place.

#### (i) L'intégration des spécificités territoriales

Les spécificités territoriales incluent différentes dimensions comme par exemple les réponses locales aux changements environnementaux, dont climatiques ([Alcamo, 2008](#)), ou encore des savoirs spécifiques accessibles seulement par le biais des acteurs locaux, qui augmentent significativement la compréhension du système ([Reed et al., 2008](#) ; [Funtowicz et Ravetz, 1993](#)). L'intégration par des processus ascendants des visions et des connaissances locales doit transparaître à travers les narratifs en prospective ([Kok et al., 2019](#)), mais également dans l'ensemble des ateliers et des mises en discussion de la gestion environnementale à l'échelle locale. Les Nations unies, dans le cadre des objectifs du développement durable et de l'Agenda 2030 ([UN, 2015](#)) préconisent que les décisions soient prises à l'échelle locale en présence des acteurs locaux. Dans le contexte d'un agenda particulier, la prise de décision collective au

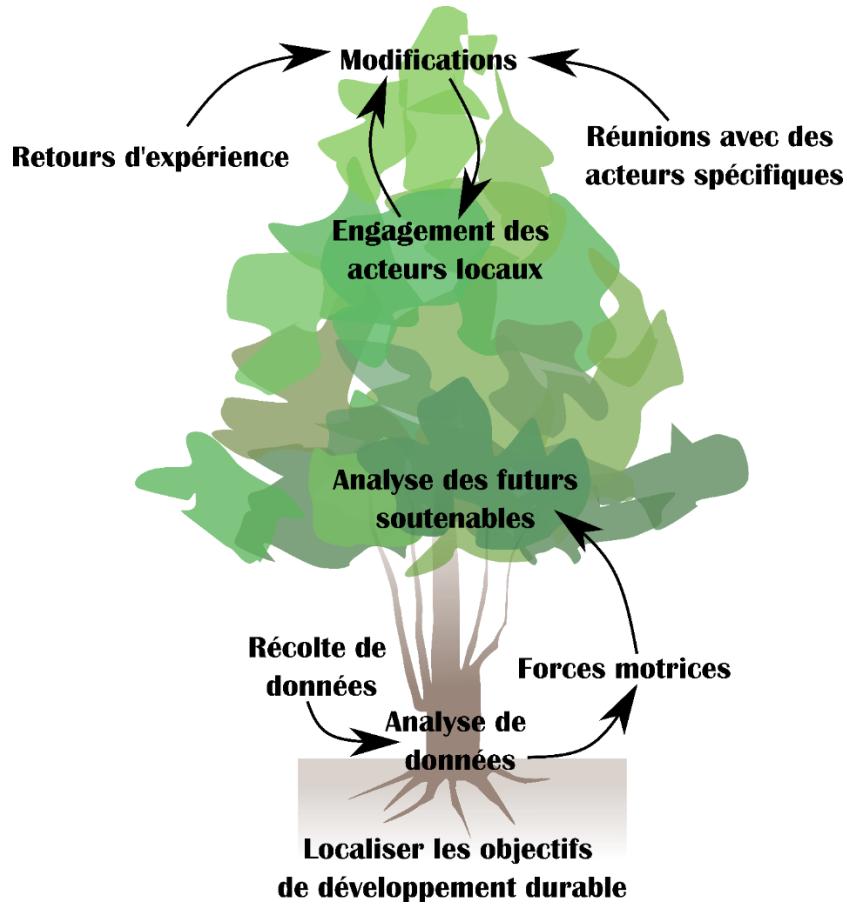


Figure 5. Processus d'élaboration du plan d'intégration des objectifs du développement durable développés par les Nations Unies au niveau local, d'après Szetey et al., 2021.

niveau local mène à des décisions soutenables et durables (Jiménez-Aceituno et al., 2019 ; Moallemi et al., 2020 ; Caruana et Pace, 2018 ; Bell and Morse, 2005). Il est toutefois nécessaire d'élaborer des cadres particuliers qui intègrent efficacement les objectifs du développement durable à l'échelle locale (Szetey et al., 2021), comme le montre la Figure 5.

Ces différentes spécificités territoriales doivent être mises en discussion et intégrées relativement tôt dans les discussions de territorialisation des lois, directives et autres planifications émises à des échelles plus grandes (étatique, européenne ou globale) (Berriet-Sollie et al., 2009). En France, les SAGE et les contrats de rivière ou encore les MAEC sont des exemples d'instruments de l'action publique de territorialisation qui ont vocation à rendre cohérent le projet politique. Cependant le recours à ces instruments peut poser des questions d'« inégalités infrarégionales » et conduire à des traitements différenciés de la vocation initiale de la politique car l'adaptation de celle-ci est insuffisamment développée/pas cohérente (Berriet-Sollie et al., 2009).

## (ii) Dépasser le verrouillage du système agro-environnemental

Les initiatives locales peuvent également dépasser le verrouillage du système agro-environnemental (Baret & Vanloqueren, 2011). En effet, l'augmentation croissante de la complexité des problèmes, notamment environnementaux, est concomitante à l'augmentation de la complexité des institutions (Tainter, 2006). Les mesures

environnementales mises en place par ces institutions sont difficilement acceptées en l'état ([Matthews, 2024](#)) et souvent contournées par des stratégies d'évitement qui touchent toutes les parties prenantes ([Bureau-Point et al., 2021](#)). L'échelle locale semble être un niveau intéressant pour produire des mesures agro-environnementales tout en évitant de les déposséder de leurs objectifs environnementaux ([Busca, 2003](#)). Dans l'exemple du bœuf des prairies Gaumaises, le verrouillage est dépassé en mettant en place avec les acteurs locaux (i) une rupture de référentiel, c'est-à-dire une alternative qui repose sur ses propres logiques marchandes, en l'occurrence une nouvelle espèce de vache à viande qui dépend d'un nouveau cahier des charges et (ii) une rupture sectorielle car le projet s'inscrit dans une logique territoriale qui met à distance les précédents jeux de pouvoirs établis ([Baret et al., 2013](#)). Cet article propose également d'autres recours au niveau local qui résultent de la capacité des agents de changement à dépasser les dimensions techniques et à intégrer le développement de méthodes innovantes dans un contexte territorial particulier. L'efficacité environnementale est une nécessité face aux enjeux environnementaux contemporains ([Wang-Erlandsson et al., 2022](#)) et elle nécessite d'imposer une écologisation des pratiques, c'est-à-dire une transformation profonde des pratiques et des modes de consommation ([Lamine, 2011](#) ; [Poux et Aubert, 2018](#)). Ainsi, la réussite dans l'objectif transformatif des prospectives participatives, à une échelle locale, dépend également des modifications radicales proposées pour les visions futures.

Les propos précédents doivent être nuancés dans la mesure où le fonctionnement d'un projet ne dépend pas seulement de la prise en compte de spécificités locales mais bien de la présence d'acteurs particuliers qui adoptent des stratégies spécifiques dans le but de produire un changement qui s'inscrit dans un agenda politique particulier ([Born & Purcell, 2006](#)).

***Les sous-questions de recherche associées au choix de l'échelle locale sont :***

- ❖ ***L'étude des spécificités territoriales dans le cadre de cette méthode a-t-elle une signification particulière pour l'étude ? pour les acteurs locaux ?***
- ❖ ***Le choix d'un cadre d'action local permet-il de contourner le verrouillage sociotechnique du système agro-environnemental ?***

## **2.2 Aborder la préservation de la ressource en eau via le prisme du changement climatique**

D'un côté, l'aspect qualitatif des ressources en eau est un sujet secondaire par rapport aux enjeux matériels posés par le changement de pratique du point de vue de la profession agricole. De nombreux projets de modification des pratiques agricoles proposent de faire de l'eau une question centrale mais les solutions collectives imaginées sont souvent des modifications à la marge des pratiques agricoles ([Tournebize et al., 2017](#)). Les systèmes agricoles dans leur ensemble ne sont alors pas remis en question et les objectifs réglementaires en rivière ou dans les nappes ne sont pas atteints.

D'un autre côté, dans la recherche, plusieurs travaux étudient la manière d'intégrer les risques liés aux effets du changement climatique sur la ressource en eau ([Wang-Erlandsson et al., 2022](#)) et l'évolution de sa gestion ([Döll et al., 2015](#) ; [Pahl-Wostl, 2007](#)). L'approche envisagée est intégrée (en termes environnemental, humain et technologique) et repose sur un passage

d'une approche prédictive et de contrôle à une approche de gestion par l'action ([Pahl-Wostl, 2007](#)). C'est également un sujet très diffusé dans les institutions de gestion territoriale et de l'eau qui cherchent à anticiper les effets du changement climatique sur les systèmes urbains et la ressource en eau au niveau local. L'évolution des changements de pratiques agricoles dues aux effets du changement climatique est davantage documentée. Qu'il s'agisse d'une évolution des pratiques dans un but d'adaptation ([Anderson et al., 2020](#)) ou d'une nécessité pour aller vers un modèle plus soutenable en changeant le type de cultures, les apports en fertilisants ou la gestion de l'eau ([Nagargade et al., 2017 ; Wang-Erlandsson et al., 2022](#)), ou encore les modes de consommation ([Nobari, 2021](#)). La question de la gestion quantitative de l'eau est récurrente dans les travaux sur la soutenabilité des nouvelles pratiques agricoles ([Wang-Erlandsson et al., 2022](#)).

Ainsi, ce travail pose l'hypothèse d'inscrire la réflexion sur la ressource en eau dans une approche plus globale d'adaptation au changement climatique. Les écosystèmes, les ressources en eau et l'agriculture sont les secteurs les plus impactés par les effets du changement climatique ([Rosenberg, 2010](#)). La question centrée sur le problème de l'eau associé aux pratiques agricoles doit être supplantée par des thématiques plus englobantes ([Mermet et al., 2005](#)) et plus fédératrices.

L'évolution des variables climatiques est utilisée comme un facteur d'impulsion qui vise à engager les participants vers un changement de pratiques. Deux raisons motivent ce choix :

- (i) Les effets sont d'ores et déjà perceptibles par les différents acteurs (en tant qu'habitant mais également dans leurs pratiques de travail), et particulièrement par le monde agricole qui est extrêmement vulnérable aux aléas climatiques ([Nagargade et al., 2017](#)). Or, le niveau d'engagement des acteurs dépend de plusieurs facteurs, dont le niveau d'expérience, notamment des effets du changement climatique ([Blennow et al., 2012](#)) et de la perception des risques engendrés ([Dow et al., 2013](#)). De manière générale, la perceptibilité du phénomène renforce l'intérêt et l'adhésion des acteurs aux démarches participatives ([Ricart et al., 2019](#)).
- (ii) Le changement climatique nous pousse à raisonner sur du long terme car les effets ressentis sont des prémisses aux changements globaux qui évoluent ([Zabel et al., 2014](#)). Cette pensée à long terme est une méthode pour envisager des changements qui peuvent être des changements structurels, par exemple d'écologisation ([Lamine, 2011](#)), afin de s'éloigner des logiques politiques court-termistes ([Smith, 2017](#)).

Le changement climatique en tant que levier à la protection de la ressource en eau commence à peine à être étudié dans le domaine de la recherche ([Blackstock et al., 2010](#)), notamment à travers les exercices prospectifs participatifs ([Bento et al., 2009 ; Ganivet, 2023](#)). C'est dans la continuité de ces exercices, en insistant particulièrement sur la variable climatique comme facteur d'intérêt et de potentiel levier aux changements de pratiques que les ateliers sont construits.

***Les sous-questions de recherche associées à l'utilisation des effets du changement climatique comme levier d'action au changement de pratique :***

- ❖ ***Le changement climatique est-il un sujet de mobilisation des acteurs locaux, notamment de la profession agricole ?***
- ❖ ***Les changements de pratiques induits par l'adaptation au changement climatique sont-ils efficaces pour la préservation de la ressource en eau ?***

### 2.3 Le choix d'une démarche « frugale »

Ici la frugalité renvoie à la limitation du développement de nouveaux outils de recherche. L'hypothèse de départ est que les outils existants, largement développés dans le cadre de travaux précédents, suffisent pour répondre aux besoins actuels. Ces outils sont multiples : modèles, méthodologies comme les diagnostic agraire, production d'atelier participatif, entretiens... Cette approche frugale s'étend également à la gestion du temps, en cherchant à restreindre (i) la durée de ce projet qui est contrainte par un contrat de thèse de trois ans et (ii) le temps de mobilisation des acteurs locaux, qu'il s'agisse des acteurs agricoles ou institutionnels.

La frugalité dans les pratiques de recherche reste un concept peu exploré dans la littérature, bien qu'il commence à soulever des interrogations, particulièrement concernant les émissions de gaz à effet de serre produites par les chercheurs qui sont largement incitées par productivisme scientifique (*Ben Ari & Berné, 2023*). Le productivisme scientifique se caractérise par la prolifération de projets visant à une reconnaissance de la légitimité d'un travail scientifique individuel (*Kläy et al., 2015*) qui repose sur des méthodologies et des technologies lourdes et coûteuses (*Hardy & Noûs, 2023*). L'exigence de preuve en recherche dépasse désormais les réponses globales, nécessitant des études spécifiques et exhaustives sur chaque variante d'un sujet. Par exemple, en chimie analytique, il ne suffit plus d'établir les impacts négatifs des pesticides sur la santé : chaque molécule doit faire l'objet d'une étude détaillée (*Oreskes & Krige, 2010*). Hardy & Noûs (2023) rappellent que ces approches découlent d'une structuration postérieure à la seconde guerre mondiale, marquée par l'essor des grands programmes de recherche et d'une augmentation significative du nombre de chercheurs. Ces programmes fondés sur des promesses techniques et méthodologiques ont promu une vision positiviste reposant sur un développement continu des outils scientifiques. L'individualisation de ces pratiques mène à un manque de réflexion autour de l'évolution des institutions, et des pratiques collectives (*Maniates, 2001*) qui est elle-même une entrave à l'évolution des pratiques vers des procédés durables et donc plus frugaux.

Dans d'autres communautés, la question de la frugalité émerge également, notamment en modélisation, autour du principe de parcimonie, visant à limiter le nombre de paramètre dans les modèles. Bien que les tendances récentes aient favorisé l'intégration croissante de processus, et donc la multiplication du nombre de paramètre, des études montrent que cette approche n'a pas amélioré la capacité prédictive des modèles (*Prentice et al., 2014*). Au contraire, cela a eu pour effet d'augmenter les incertitudes liées à chaque paramètre. Face à ces limites, certains chercheurs plaident pour une optimisation de la paramétrisation des processus existants, afin d'éviter une surparamétrisation inutile.

*Les sous-questions de recherche associées à l'usage d'une démarche frugale dans ce projet de thèse sont :*

- ❖ *Est-il possible de produire un travail de recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire frugal ?*
- ❖ *La mobilisation d'outils préexistants est-elle un gage de gain de temps ?*

### 3. Une approche interdisciplinaire et transdisciplinaire

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'étude des **sciences de la durabilité** qui visent à « réorganiser la science pour la mettre au service du développement durable en dépassant les frontières disciplinaires et en privilégiant des programmes de recherche axés sur des solutions » (IRD). En effet, cette thèse tâche de :

- (i) Réunir une diversité de disciplines, dans le but de partager une valeur environnementaliste commune ([Klüy et al., 2015](#)), en l'occurrence la dégradation de la qualité des rivières, qui est un objet complexe s'inscrivant dans un système dépendant de facteurs variables : technique, économique, social, écologique, politique... Il existe une multitude d'approches issues de chacune de ces disciplines qui peuvent être combinées pour donner une vision d'ensemble la plus contextualisée possible et la plus transparente.
- (ii) D'initier un accompagnement au changement de pratiques agricoles à une échelle locale, c'est-à-dire sur un agro-hydrosystème de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>.

Ce travail propose une approche qui repose sur l'association de sciences de la prospective, de la participation et de la modélisation agro-hydrologique et est en ce sens inter et transdisciplinaire.

Originalité du projet de thèse dans la famille des approches couplant prospective, participation et modélisation

L'association de ces trois approches est toujours produite dans un contexte d'approches prospectives basée sur le développement de méthodes qualitatives alliées aux méthodes quantitatives ([Kok et al., 2007](#) ; [Alcamo, 2008](#)). Le principal objectif est de représenter la complexité d'agro-socio-hydrosystèmes ([Zellmer et al., 2006](#)). L'approche principale, desquelles découlent l'ensemble des méthodes est l'approche « story and simulation » (SAS) ([Alcamo, 2008](#)). Les principaux objectifs sont d'allier les deux faces d'un scénario qui co-évoluent de manière itérative :

- Les narratifs, qui décrivent le déroulé des évènements amenant à l'état futur, ainsi que ses caractéristiques. Le développement des narratifs conduit à l'identification de facteurs structurants de l'état futur et à leur caractérisation.
- La quantification des facteurs soulignés par les narratifs. Cette quantification se fait à travers une modélisation plus ou moins complexe et plus ou moins informatisée.

Il existe de nombreuses méthodes qui découlent de l'approche SAS qui décrivent les interactions entre la société et l'environnement, qui sont entourés en rouge sur la Figure 6. Ces méthodes permettent d'atteindre différents objectifs comme la caractérisation d'un

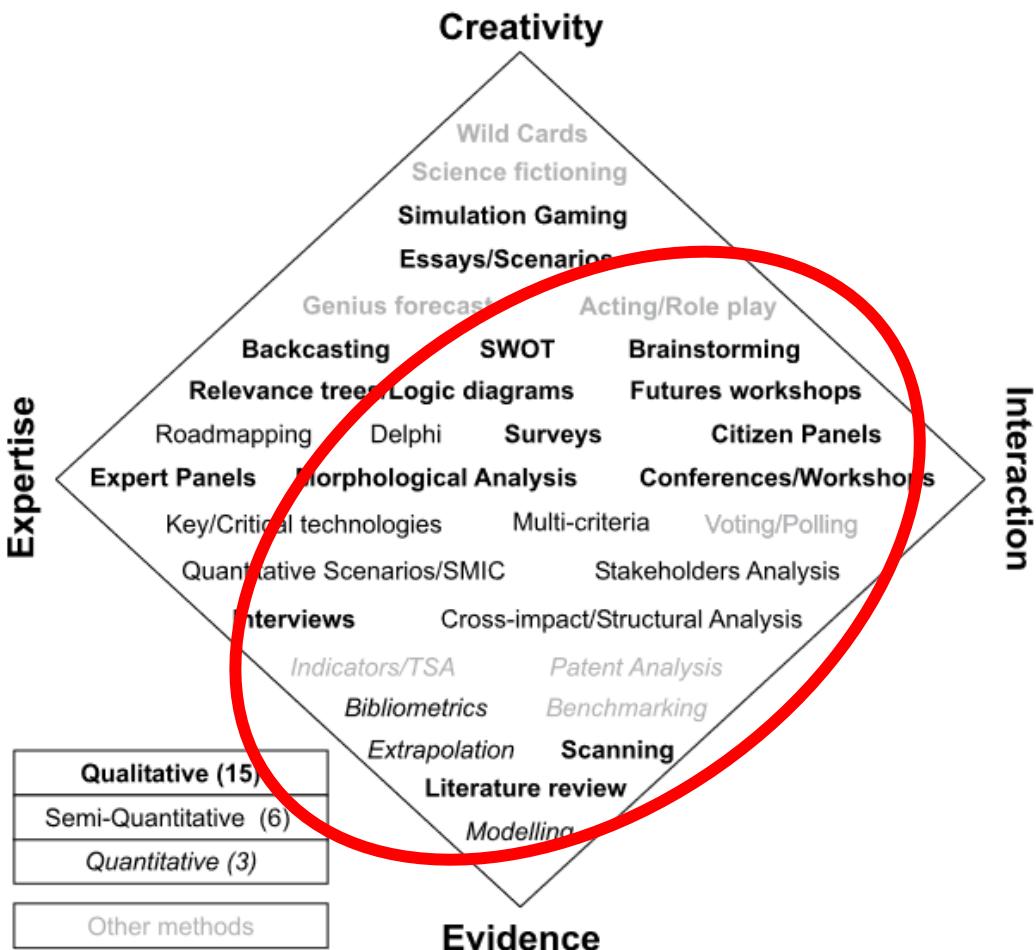


Figure 6. Panoplie de prospectives rangées en fonction de participants mobilisé et de la complexité de l'outil de modélisation utilisé, les encadrés en rouge représentent les méthodes qui nous intéressent particulièrement (Popper, 2008).

système, l'évaluation des effets des changements de mode de vie sur un système ou l'implication des parties prenantes dans un processus décisionnel ou de changements de pratiques. Nous nous intéressons à la variabilité de certaines de ces méthodes selon différents critères : (i) le degré d'implication des parties prenantes dans la construction des scénarios et dans la modélisation ; (ii) le niveau de complexité des outils de modélisation et (iii) le type de public auquel est adressé l'exercice et sa capacité à modifier l'environnement (Tableau 1).

L'ensemble de ces méthodes comportent des points positifs et des limites. Par exemple, la méthode DPSIR ne prend pas en compte les dynamiques internes d'un système (Fernandez et al., 2011) ce qui a pour effet de mal dessiner les liens de causalités qui sont représentés comme étant linéaires et unidirectionnels. La modélisation d'accompagnement quant à elle est un exercice chronophage qui repose sur une série d'itération. Certaines méthodes, comme la méthode Delphi ou la création de scénario par les institutions, ont de grandes limites en termes d'implication d'un ensemble de participants, et non pas que des experts. C'est pourquoi nous proposons une démarche particulière qui est dédiée à l'investissement du plus grand nombre de partie prenante possible pour créer des futurs désirables. Ces scénarios seront modélisés par des modèles dynamiques et spatialisés. Dans un souci d'économisation de temps, la partie sur la consolidation des scénarios et leur modélisation ne se fera pas par les participants. Néanmoins, une itération aura lieu entre la production initiale des scénarios

par les participants et la présentation de leur forme finale et des résultats de leur simulation sous effet climatique.

*Tableau 1. Comparaison de différentes méthodes de prospectives basée sur des critères de construction de scénario, de modélisation et de publics impliqués (✓ symbolise oui ; X symbolise non).*

Méthodes	Objectifs	Construction des scénarios par les participants	Modélisation participative	Complexité des outils de modélisation	Type de public visé
DPSIR <i>Carr et al., 2007</i>	La caractérisation d'un système repose sur un ensemble de paramètres (Forces, Pressions, Etat, Impact, Réponses). L'évolution des forces et des pressions modifie un état futur de ce système environnemental.	Scénarios simplifiés, pas toujours de narratifs	✓	Faible	Décideurs politiques
Delphi <i>Rikkonen et al., 2006</i>	L'état futur d'un système est caractérisé par un ensemble d'experts qui répondent aux mêmes questions de manière itérative.	X	X	Savoirs d'experts peuvent se baser sur de la modélisation	Experts
Modélisation d'accompagnement et diagrammes logiques <i>Barnaud et al., 2006</i> <i>Kok et al., 2007</i>	La modélisation est un moyen d'accéder à une représentation commune d'un système dont le fonctionnement est représenté de manière dynamique afin d'observer les causalités entre les activités, décisions politiques etc et les états environnementaux .	✓	✓	- simulation à base d'agents - production de diagrammes de causalité (ARDI <sup>1</sup> , fuzzy diagrams...) - représentations spatiales	Tout type de public
Jeux sérieux <i>Barreteau et al., 2022</i>	Le jeu est une méthode pour représenter un système évolutif et dynamique en fonction des décisions de tous les participants	Scénarios se construisent par le jeu	✓	Les jeux sérieux sont les outils de simulation	Tout type de public
Création de scénarios <i>Scénario ADEME</i>	Les scénarios sont des moyens de discuter collectivement de futurs désirables et des conditions de faisabilités au changement	✓	Rarement	Très variables, souvent des modèles intégrés	Experts et décideurs politiques

<sup>1</sup> ARDI = Amélioration des performances par la Réalisation de Défis Interactifs

*Les sous-questions de recherche associées à l'usage de l'interdisciplinarité sont :*

- ❖ *L'association de ces approches permet-elle de mobiliser les acteurs et d'engager un changement de pratiques agricoles dans une optique d'amélioration qualitative et quantitative des ressources en eau ?*
- ❖ *Quelle méthodologie suivre pour produire un travail transparent, cohérent et robuste dans le cadre d'une prospective participative ?*

#### **4. Organisation du manuscrit**

Cette thèse propose de développer une méthode d'engagement des acteurs dans un changement de pratiques agricoles. La méthode est testée sur un cas d'étude, le bassin versant de la Souffel, mais vise à être généralisable sur d'autres territoires à enjeux sur la ressource en eau. Après cette introduction générale, le premier chapitre est consacré à la présentation de la méthode développée, en décrivant les principaux choix concernant la prospective, la participation et la modélisation et leur justification. Ce chapitre décrit également la méthode globale construite dans ce projet de thèse.

Le deuxième chapitre décrit le site d'étude avec ses spécificités climatiques, topographiques, pédologiques, agricoles et sociales ; les différentes politiques agro-environnementales appliquées au territoire et le contexte agricole dans lequel elles s'inscrivent. Dans ce chapitre, les éléments méthodologiques territoire-dépendant et ceux directement transposables sur d'autres territoires à enjeux sont également détaillés.

Les chapitres suivants sont organisés thématiquement autour des trois ateliers participatifs et du travail qui en a résulté. Le chapitre trois aborde la question de la production d'un diagnostic partagé sur la question climatique en détaillant dans une première partie le travail produit sur les données climatiques à l'échelle locale et dans une seconde partie les résultats du premier atelier sur la perception des effets du changement climatique par les participants. Le chapitre quatre détaille la méthodologie utilisée pour construire les récits du territoire à l'horizon 2070 et leur transformation en données d'entrées de modélisation. Ces récits sont travaillés à partir des dires d'acteurs collectés lors du deuxième atelier puis traduits dans des images cohérentes et robustes. Ces images, sous forme de récit sont ensuite transformées en variables qui représentent les données d'entrées aux modèles agro-hydrologiques. Le chapitre cinq présente les résultats de modélisation en détaillant d'abord les résultats relatifs au territoire existant puis aux différentes images à l'horizon 2070. Le chapitre six traite les résultats issus du troisième et dernier atelier en dressant un bilan de l'engagement vers le changement de pratiques et en pointant les ajustements à envisager. Enfin, la conclusion revient sur les principales hypothèses testées dans cette étude, propose des alternatives et perspectives possibles, notamment pour adapter cette méthode à d'autres contextes.

## Références

- Agence de l'Eau Seine Normandie. (2022). Analyse de cas inspirants de démarches de protection d'aires d'alimentation de captages sur le bassin Seine-Normandie. AScA.
- Alcamo, J. (Ed.). (2008). *Environmental futures: the practice of environmental scenario analysis*. Elsevier.
- Amblard, L. (2019). Collective action for water quality management in agriculture: The case of drinking water source protection in France. *Global Environmental Change*, 58, 101970.
- Anderson, R., Bayer, P. E., & Edwards, D. (2020). Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current opinion in plant biology*, 56, 197-202.
- ANSES. (2023). *Campagne nationale de mesure de l'occurrence de composés émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine*. Rapport d'appui scientifique et technique.
- AQUASTAT. (2020). Retraits annuels d'eau douce pour l'agriculture (% des retraits totaux d'eau douce), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Barataud, F., Aubry, C., Wezel, A., & Mundler, P. (2014). Management of drinking water catchment areas in cooperation with agriculture and the specific role of organic farming. Experiences from Germany and France. *Land use policy*, 36, 585-594.
- Baret, P., & Vanloqueren, G. (2011). Des laboratoires aux champs: les enjeux d'un changement de paradigme.
- Baret, P., Stassart, P. M., Vanloqueren, G., & Van Damme, J. (2013). Dépasser les verrouillages de régimes socio-techniques des systèmes alimentaires pour construire une transition agroécologique. In *Premier Congrès Interdisciplinaire sur le Développement durable*. ULB-UCL, Namur, Belgium.
- Barnaud, C., Promburom, P., Raj Gurung, T., Le Page, C., & Trébuil, G. (2006). Companion modelling for collective learning and action in water management: lessons learnt from three case studies in northern Thailand and Bhutan.
- Barraqué, B., & Viavattene, C. (2009). Eau des Villes et Eau des Champs: vers des accords coopératifs entre services publics et agriculteurs?. *Économie rurale*, 310(2), 5-21.
- Barreteau, O., Charpentier, I., Blanchoud, H., Bonnefond, M., Gouy, V., Piscart, C., ... & Salvador-Blanes, S. (2022). Exp'Eau, un jeu sérieux pour explorer les trajectoires d'amélioration de la qualité de l'eau dans les bassins versants ruraux. *Dynamiques environnementales. Journal international de géosciences et de l'environnement*, (49-50), 27-53.
- Bell S, Morse S. (2005). Experiences with sustainability indicators and stakeholder participation: A case study relating to a 'Blue Plan' project in Malta. *Sustainable Development* 12: 1–14
- Ben Ari, T., & Berné, O. (2023). «La frugalité, un terme un peu radioactif». Entretien avec Tamara Ben Ari et Olivier Berné, cofondateurs de Labos 1point5. *Socio. La nouvelle revue des sciences sociales*, (17), 67-82.
- Bento, S., Fatima, D., Errahj, M., Faysse, N., Garin, P., Audrey, R. F., & Varanda, M. (2009). Farmers' relations to climate variabilities and changes: the case of groundwater users of coastal aquifers in France, Portugal and Morocco. In 9th Conference of the European Sociological Association.
- Berriet-Solliec, M., Baudry, J., & Labarthe, P. (2008). L'évaluation des politiques à l'épreuve des faits: les apports des méthodes d'Evidence based policies. In *2. Journées de recherches en sciences sociales* (p. np).
- Berriet-Solliec, M., Roy, A. L., & Trouvé, A. (2009). Territorialiser la politique agricole pour plus de cohésion. *Économie rurale*, 313(4), 129-146.
- Billen, G., Garnier, J., Nemery, J., Sebilo, M., Sferratore, A., Barles, S. & Benoît, M. (2007). A long-term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *Science of the total Environment*, 375(1-3), 80-97.
- Blackstock, K. L., Ingram, J., Burton, R., Brown, K. M., & Slee, B. (2010). Understanding and influencing behaviour change by farmers to improve water quality. *Science of the total environment*, 408(23), 5631-5638

- Blennow, K., Persson, J., Tomé, M. and Hanewinkel, M. (2012). Climate Change: Believing and Seeing Implies Adapting. *PLoS ONE*, 7(11). e50182.
- Born, B., & Purcell, M. (2006). Avoiding the local trap: Scale and food systems in planning research. *Journal of planning education and research*, 26(2), 195-207.
- Bouleau, G. (2009). La contribution des pêcheurs à la loi sur l'eau de 1964. *Économie rurale*, 309(1), 9-21.
- Bureau-Point, E., Barthélémy, C., Demeulenaere, E., Doudou, D. T., & Thivet, D. (2021). Les mondes agricoles face au problème des pesticides. Compromis, ajustements et négociations. Introduction au dossier. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 21(3).
- Busca, D. (2003). Agriculture et environnement. La mise en œuvre négociée des dispositifs agri-environnementaux. Effets d'organisation, enjeux de territoire et dynamique d'appropriation stratégique. *Ruralia*.
- Carr, E. R., Wingard, P. M., Yorty, S. C., Thompson, M. C., Jensen, N. K., & Roberson, J. (2007). Applying DPSIR to sustainable development. *International journal of sustainable development & world ecology*, 14(6), 543-555.
- Caruana, C., and Pace, P. (2018). Local agenda 21 processes and their implications for the SDGs. In *Handbook of Lifelong Learning for Sustainable Development*, W. Leal Filho, M. Mifsud, and P. Pace, eds. (Springer International Publishing), pp. 293–305.
- Cour des comptes. (2019). Le bilan des comptes Ecophyto Référez n° S2019-2659
- De Fraiture, C., Wichelns, D. (2010). Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural Water Management*, volume 97, issue 4, p. 502-511, ISSN 0378-3774.
- Deverre, C., & de Sainte Marie, C. (2008). L'écologisation de la politique agricole européenne. Verdissement ou refondation des systèmes agro-alimentaires?. *Review of Agricultural and Environmental Studies-Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement (RAEStud)*, 89(4), 83-104.
- Döll, P., Jiménez-Cisneros, B., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G. & Nishijima, A. (2015). Integrating risks of climate change into water management. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 4-13.
- European Comission. (2021). *Economic data related to the implementation of the Water Framework Directive and the Floods Directive and the financing of measures*.
- Etienne, M. (2010). *La modélisation d'accompagnement: une démarche participative en appui au développement durable* (p. 384). éditions Quae.
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of water resources planning and management*, 132(3), 129-132.
- Fernandez, S., Bouleau, G., & Treyer, S. (2011). Reconsidérer la prospective de l'eau en Europe dans ses dimensions politiques. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 2(3).
- Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7), 739-755.
- Ganivet, E. (2023). *Eau, territoires et changements globaux: vers une approche systémique et participative de modélisation pour concevoir et agir en complexité* (Doctoral dissertation, Université de Rennes).
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2023). Rapport de synthèse : changements climatiques 2023.
- Hardy, A., & Noûs, C. (2023). Quantifier la frugalité de la recherche?. *Socio. La nouvelle revue des sciences sociales*, (17), 83-117.
- Hassenforder, E., Barreteau, O., Barataud, F., Souchère, V., Ferrand, N., & Garin, P. (2020). Enjeux et pluralité de la participation dans la gestion intégrée des ressources en eau. *Eau et agriculture: gestion intégrée et gouvernance territoriale*, Voltz, M., Burger Leenhardt, D., Barreteau, O.(ed.), Collection QUAE «Matière à débattre et décider».
- Kläy, A., Zimmermann, A. B., & Schneider, F. (2015). Rethinking science for sustainable development: Reflexive interaction for a paradigm transformation. *Futures*, 65, 72-85.

- Kok, K., Biggs, R., & Zurek, M. (2007). Methods for developing multiscale participatory scenarios: insights from southern Africa and Europe. *ecology and society*, 12(1).
- Kok, K., Pedde, S., Gramberger, M., Harrison, P.A., Holman, I.P. (2019). New European socio-economic scenarios for climate change research: operationalising concepts to extend the shared socio-economic pathways. *Reg. Environ. Chang.* 19 (3), 643–654.
- Lamine, C. (2011). Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *Journal of rural studies*, 27(2), 209-219.
- Lumbroso, S., Coreau, A., Narcy, J.B., Poux, X. (2020). Fabriquer des situations de gestion futures pour favoriser des enjeux environnementaux : quel intérêt stratégique de démarches prospectives pour des acteurs d'environnement ? Dans *L'environnement en mal de gestion : les apports d'une perspective situationnelle*. Presses Univ. Septentrion.
- Maniates, M. F. (2001). Individualization: Plant a tree, buy a bike, save the world?. *Global environmental politics*, 1(3), 31-52.
- Matthews, A. (2024). Farmer Protests and the 2024 European Parliament Elections. *Intereconomics*, 59(2), 83-87.
- Mermet, L., & Poux, X. (2002). Pour une recherche prospective en environnement. Repères théoriques et méthodologiques. *Nature Sciences Sociétés*, 10(3), 7-15.
- Mermet, L., Billé, R., Leroy, M., Narcy, J. B., & Poux, X. (2005). L'analyse stratégique de la gestion environnementale : un cadre théorique pour penser l'efficacité en matière d'environnement. *Natures sciences sociétés*, 13(2), 127-137.
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2022). *La pollution des eaux superficielles et souterraines en France - Synthèse des connaissances en 2022*.
- Moallemi, E. A., Malekpour, S., Hadjikakou, M., Raven, R., Szetey, K., Ningrum, D., ... & Bryan, B. A. (2020). Achieving the sustainable development goals requires transdisciplinary innovation at the local scale. *One Earth*, 3(3), 300-313.
- Morgan, R. P. C. (2020). Soil degradation and erosion as a result of agricultural practice. In *Geomorphology and soils* (pp. 379-395). Routledge.
- Moss, B. (2008). Water pollution by agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, volume 363, p. 659–666
- Nagargade, M., Tyagi, V., & Kumar, M. (2017). Climate smart agriculture: an option for changing climatic situation. *Plant Engineering by Snježana Jurić*, IntechOpen, 143-165.
- Nicourt, C., & Girault, J. M. (2002). Politiques réglementaires et politiques volontaires : un couple de prescriptions efficace pour limiter les pollutions d'origine agricole? *INRA Sciences Sociales*, 2001.
- Nobari, N. (2021). Social movements in the transformation of food and agriculture systems. In *Rethinking food and agriculture* (pp. 371-397). Woodhead Publishing.
- Oreskes, N. & Conway, E. (2010). *Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming*, New York, Bloomsbury Press.
- Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water resources management*, 21, 49-62.
- Persson, L., Almroth, B., Collins, C. et al. (2022). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental Science & Technology*, volume 56, issue 3, p. 1510-1521
- Popper, R. (2008). How are foresight methods selected?. *foresight*, 10(6), 62-89.
- Poux, X., & Aubert, P. M. (2018). An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. *Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise, Iddri-AScA, Study*, 9, 18.
- Prentice, I. C., Liang, X., Medlyn, B. E., & Wang, Y. P. (2015). Reliable, robust and realistic: the three R's of next-generation land-surface modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(10), 5987-6005.

- Reed, M.S., Dougill, A.J., Baker, T. (2008). Participatory indicator development: what can ecologists and local communities learn from each other? *Ecological Applications* 18, 1253e1269
- Ricart, S., Rico, A., Kirk,N., Bülow, F., Ribas-Palom, A., and Pavón, D. (2019). How to improve water governance in multifunctional irrigation systems ? Balancing stakeholder engagement in hydrosocial territories. *International Journal of Water Resources Development*, volume 35, issue 3, p. 491-524.
- Rikkonen, P., Kaivo-oja, J., & Aakkula, J. (2006). Delphi expert panels in the scenario-based strategic planning of agriculture. *Foresight*, 8(1), 66-81.
- Rodriguez, J. M., Molnar, J. J., Fazio, R. A., Sydnor, E., & Lowe, M. J. (2009). Barriers to adoption of sustainable agriculture practices: Change agent perspectives. *Renewable agriculture and food systems*, 24(1), 60-71.
- Rosegrant, M., Ringler, C. and Zhu, T. (2009) Water for Agriculture: Maintaining Food Security under Growing Scarcity. *Annual Review of Environment and Resources*, volume 34:205–22.
- Rosenberg, N. J. (2010). Climate change, agriculture, water resources: what do we tell those that need to know?. *Climatic change*, 100(1), 113.
- Ruane, A. C., Rosenzweig, C., Asseng, S., Boote, K. J., Elliott, J., Ewert, F. & Thorburn, P. J. (2017). An AgMIP framework for improved agricultural representation in integrated assessment models. *Environmental Research Letters*, 12(12), 125003.
- Salles, D. (2006). Les défis de l'environnement. *Démocratie et efficacité*.
- Schwarzenbach, R., Egli, T., Hofstetter, T., Gunten, U. and Wehrli, B. (2010). Global Water Pollution and Human Health. *Annual Review of Environment and Resources*, volume 35, issue 1, p.109-136.
- Szetey, K., Moallemi, E. A., Ashton, E., Butcher, M., Sprunt, B., & Bryan, B. A. (2021). Participatory planning for local sustainability guided by the Sustainable Development Goals. *Ecology & Society*, 26(3).
- Tainter, J. A. (2006). Social complexity and sustainability. *Ecological complexity*, 3(2), 91-103.
- Tournebize, J., Seguin, L., Bouarfa, S., Chaumont, C., Lebrun, J., Bontoux, C. & Rougier, J. E. (2018). Projet Brie'EAU: Vers une nouvelle construction de paysage agricole et écologique sur le territoire de la Brie: associer qualité de l'eau et biodiversité. *Recueil des résumés*, 143.
- UN (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development (The United Nations (UN)).
- Warin, P. (1993). Les relations de service comme régulations. *Revue française de sociologie*, 69-95.
- Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R. J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M., ... & Rockström, J. (2022). A planetary boundary for green water. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(6), 380-392.
- Wilkinson J., Boxall A., Kolpin D. et al. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volume 119, issue 8.
- Yang, Y., Zhang, X., Jiang, J., Han, J., Li, W., Li, X., Leung, K., Snyder, S. and Alvarez, P. (2021). Which Micropollutants in Water Environments Deserve More Attention Globally? *Environmental Science & Technology*, volume 56, issue 1, p.13–29.
- Zabel F, Putzenlechner B, Mauser W (2014) Global Agricultural Land Resources – A High Resolution Suitability Evaluation and Its Perspectives until 2100 under Climate Change Conditions. *PLoS ONE* 9(9): e107522.
- Zakeossian, D., Poux, X., Ménard, M., Billy, C., Guichard, L., Steyaert, P., & Gascuel, C. (2017). Protéger les captages d'eau potable contre les pollutions diffuses agricoles : quelles connaissances pour (re) penser un cadre d'action publique efficace?. *Innovations Agronomiques*, 57, 7-19.
- Zellmer, A. J., Allen, T. F., & Kesseboehmer, K. (2006). The nature of ecological complexity: A protocol for building the narrative. *Ecological complexity*, 3(3), 171-182.

## Chapitre 1 : Construire la démarche de prospective engageante

Ce chapitre détaille d'une part l'historique et les questions de méthodologies principales liées à chaque discipline mobilisée dans la construction de cette démarche et d'autre part l'ensemble des choix qui ont conduit à l'élaboration de la méthode générique dont l'objectif principal est d'engager les acteurs au changement de pratique. Une prospective engageante mobilise les acteurs locaux en construisant des futurs désirables, facilitant ainsi des décisions collectives soutenables pour le système agro-hydrologique. Cette méthode de prospective environnementale participative s'appuie sur des approches qualitatives et quantitatives que sont la formulation de récits et la modélisation de ces derniers. Plus précisément, à partir d'un diagnostic partagé sur l'état actuel du bassin versant et les conditions hydro-climatiques futures, à l'horizon 2070, les acteurs sont invités à concevoir collectivement des scénarios d'adaptation de leurs pratiques. Ces images à l'horizon 2070 sont simulées à l'aide de modèles agro-hydrologiques et les résultats mis en discussion sous l'angle de la soutenabilité. La thèse repose par ailleurs sur un parti pris de frugalité qui a imposé certaines contraintes comme l'utilisation de modèles existants, des ateliers au format court pour s'adapter aux contraintes temporelles et la réutilisation de matériel déjà existant.

Cette méthode associe trois approches : la prospective, la participation et la modélisation. Les trois premières parties présentent les hypothèses de travail et les choix spécifiques opérés par champ disciplinaire. Ces trois parties présentent des structures identiques : (i) l'historique de l'approche, (ii) une présentation des méthodologies issues de la discipline employée dans ce travail et la justification du choix de la discipline vis-à-vis des objectifs de travail, (iii et iv) la justification de choix spécifiques au domaine opérés dans ce travail et la forme qu'ils prennent et (v) la description de l'incidence du parti pris de frugalité sur ce travail. La dernière partie du chapitre détaille les étapes méthodologiques de l'approche finale.

### 1. Le recours à la prospective

La prospective est un moyen de se projeter dans le temps long afin d'envisager des futurs potentiellement très éloignés de la **trajectoire tendancielle** qui « présente l'évolution prévisible d'une situation en l'absence de toute nouvelle action volontaire » (Ministère de la Culture). Ce qui est questionné dans cette approche c'est (i) la capacité des parties prenantes à imaginer des futurs différents et désirables et (ii) la capacité d'utiliser le changement à long terme pour engager le changement de pratique à court terme. Cette partie présente ce qui a motivé le choix de la prospective, ce que cela produit, et les éléments particuliers mobilisés dans ce travail ainsi que la justification de ces choix. La présentation des choix effectués est accompagnée de verbatims issus d'entretiens de prospectivistes qui ont été interrogés sur leurs pratiques, les observations qu'ils ont pu faire sur ce que produit la prospective à l'échelle des participants mais aussi du débat public. Ces entretiens ont été effectués au cours d'un stage de M2 co-encadré lors de ma 2<sup>ème</sup> année de thèse, de Gaétan Pénin, qui travaillait sur les déterminants principaux des trajectoires de transition des agrosystèmes dans un corpus de prospectives. Ces différents points de vue permettent de nourrir l'intérêt d'utiliser des prospectives dans une perspective engageante.

## 1.1 Historique du champ disciplinaire de la prospective

La prospective est une science à visée transformative qui repose sur l'élaboration de futurs possibles dont la mise en place requiert des stratégies d'action collectives, soumises à controverses ([Mermet & Poux, 2002](#)), afin d'aller vers un futur souhaité ([Coreau et al., 2009](#)). L'outil principal de la prospective est la production et l'étude de scénarios ([Inayatullah, 2008](#)). L'élaboration de futurs implique une connaissance de la situation actuelle et passée et peut faire l'objet d'une visée stratégique sur la trajectoire à mettre en place. Cette discipline a émergé dans les années 1930 et s'est renforcée pendant la seconde guerre mondiale afin de répondre à un besoin croissant d'anticipation de la classe politique, notamment pour des questions militaires aux Etats-Unis. La prospective a ensuite été popularisée dans les années 60 ([Kahn & Wiener, 1967](#)). Elle est d'abord développée en tant qu'outil narratif pour décrire des images du futur et/ou des trajectoires qui décrivent le cheminement vers une image future. Elle a été par exemple utilisée en France par les pouvoirs publics afin de planifier l'aménagement du territoire au niveau régional en détaillant les évolutions sociales, économiques et politiques à un horizon 2000 ([OTAM, 1971](#)). Dans les années 70, la prospective institutionnalise ses pratiques, en revendiquant des chaires et des postes de professeurs à l'Université, ce qui institutionnalise la pratique académique et les méthodes spécifiques associées ([Julien et al., 1975](#)) pour que le champ intègre des organisations internationales comme l'UNESCO, l'OCDE et la Commission européenne. Dans le domaine environnemental, la première étude d'envergure quantitative est le rapport Meadows ([Meadows et al., 1972](#)) qui a donné un élan à l'utilisation de la prospective dans tous les champs environnementaux, et notamment dans le domaine de l'eau comme en témoigne la création de la commission mondiale de l'eau ([Gallopin & Ejsberman, 2000](#)).

## 1.2 Choix de la prospective et ce que cela produit

### Définitions

Il existe différentes écoles de prospective, ce qui signifie qu'il est possible de faire de la prospective de différentes manières, de conduire des créations de scénarios avec des stratégies différentes qui conduisent à des types de scénarios différents. Les définitions et concepts présentés tout au long de cette introduction sont ceux utilisés par la communauté des *story and simulation (SAS) approaches* dont le travail a beaucoup inspiré ce travail de thèse.

Le **scénario** est un objet scientifique qui peut être évalué par le biais de critères définis qui sont la pertinence, la crédibilité, la légitimité (au sens d'une vision partagée avec les acteurs de la discipline) et la créativité ([Acalmo, 2008](#)). Plus récemment, la littérature insiste sur la question de la transparence et de la cohérence dans l'élaboration de scénario ([Kosow, 2015](#) ; [Kunseler et al., 2015](#) ; [Jahel et al., 2023](#)).

Il existe plusieurs types de scénario ([Wilkinson & Eidinow, 2008](#) ; [Börjeson et al., 2006](#)) qui seront combinés dans cette étude :

- Prévisionnels : qui expriment les trajectoires probables s'inscrivant dans une trajectoire tendancielle ou soumise à des paramètres anticipables.

- Exploratoires contrastés : qui explorent des futurs plausibles mais différents de la trajectoire tendancielle, notamment en s'appuyant sur des signaux faibles qui sont des événements mineurs susceptibles de produire à long terme une modification notable du système global, comme par exemple le régime alimentaire non carné.
- Normatifs : qui interrogent les conditions spécifiques de réalisation d'un futur soumis à certains critères.

Ces scénarios reposent sur des stratégies différentes qui peuvent être associées bien qu'elles ne produisent pas la même information. Une première stratégie est la caractérisation d'un état physique, social, politique à un temps futur donné. Les rapports du GIEC sont représentatifs de ce type de scénario par la synthèse et la diffusion de prévisions quantitatives qui favorisent la représentation de paramètres environnementaux soumis au forçage climatique en fonction des émissions de gaz à effet de serre à différents horizons (jusqu'en 2100). Une deuxième stratégie consiste à mettre en place une stratégie de planification d'un état futur souhaitable du point de vue environnemental (*Raskin et al., 1998*), social ou économique.

***Ce projet de thèse vise à allier ces deux stratégies afin de pouvoir à la fois caractériser un état futur sur la base de résultats de modélisation agro-hydrologique mais aussi de pouvoir mettre en place une stratégie d'action collective à court terme.***

#### *La prospective produit du débat public*

La prospective est un moyen de produire du débat d'idée en investissant la sphère publique et politique. Pour les prospectivistes interrogés, c'est même tout « l'enjeu des scénarios, qu'ils arrivent à produire du débat, de pouvoir se faire entendre » ; « ce projet (de prospective) il est construit dans une logique de servir le débat public, d'être un outil du débat public ». L'émergence d'un sujet en prospective est relative à diverses raisons, par exemple liées à un agenda politique (*Labbouz et al., 2021*), ou parce que certaines institutions veulent s'en emparer (*Thiriot, 2022*). Il est également possible pour les institutions ou d'autres organismes de se saisir de sujets portant sur certaines politiques jugées inefficaces pour étudier la/les manières de réformer ou de mettre en place une stratégie sur des enjeux particuliers (*Réchard-Spence, 2019*). Finalement, la prospective vise à créer des scénarios différents du scénario tendanciel.

La prospective étant un domaine académique, la conception des scénarios est cadastrée par différentes règles qui structurent les mondes alternatifs afin qu'ils soient rendus plausibles par leur cohérence et leur robustesse (*Kunzeler et al., 2015* ; *Jahel et al., 2023*). La réalisation de ce travail académique a pour effet de légitimer ces futurs pour les rendre audibles et plausibles auprès des différentes parties prenantes. Encadrer la création du récit pour le rendre cohérent crédibilise des propositions en rupture avec le scénario tendanciel, facilitant leur introduction dans le domaine politique et leur concrétisation (*Preiser et al., 2024*). La robustesse de ces futurs divergents permet de « fournir un argumentaire à des gens qui défendent une certaine vision » (P2), mais aussi d'obtenir des contre-arguments favorables au changement face à des systèmes solidement implantés dont l'inertie au changement est forte, particulièrement face aux défis environnementaux (*Hannan & Freeman, 1984*). L'objectif est de produire des futurs alternatifs de rupture qui nécessitent une modification

des systèmes afin d'en extraire des arguments mobilisables au sein d'un débat d'idées qui reposent sur une certaine robustesse scientifique. Cette légitimation est souvent appuyée par la quantification qui peut porter sur différents volets comme par exemple la diminution de la pollution dans certains compartiments environnementaux, le rendement agricole ou la rentabilité économique (*Poux & Aubert, 2018 ; Couturier et al., 2016*). La quantification est une façon de montrer les effets des changements de mode de vie ou de pratiques et peut également montrer la trajectoire nécessaire pour opérer un changement. La légitimation d'une prospective repose également en partie sur la reconnaissance, notamment académique et institutionnelle, des différentes personnes ou structures porteuses du projet. En effet, l'information peut être perçue et diffusée très différemment au sein du débat public en fonction de la nature de l'organisme commanditaire, par exemple s'il s'agit d'une association ou d'une institution.

Selon les résultats et l'argumentaire, on peut élaborer des discours positifs sur certaines alternatives souvent discréditées, comme l'agriculture biologique ou l'agroécologie. La création de futurs positifs et désirables en prospective n'est pas si aisée « on s'est collectivement rendu compte que c'était pas facile d'imaginer des futurs positifs » (P1), notamment car ils visent à résoudre des problèmes qui n'ont pas encore été réglés précédemment (*Ogilvy, 2014*). Elle est cependant importante car la notion de désirabilité fait partie de l'argumentaire utilisé pour convaincre de la nécessité de changer de système, et les acteurs porteurs du changement doivent également appuyer ce message. Cette notion de désirabilité étant très variable d'un individu à l'autre et afin de cadrer le débat, nous nous appuyons sur des objectifs scientifiques globaux de soutenabilité vers lesquels il faut tendre sur les questions environnementales, sociales et de gouvernance (*Biermann et al., 2012 ; Biermann et al., 2016 ; Bai et al., 2016*).

**Dans ce projet de thèse, il est crucial de produire de nouveaux horizons et de les mettre en débat avec les acteurs locaux. Cela s'inscrit dans une stratégie visant à réfléchir à l'évolution des pratiques. La majorité des acteurs locaux présents s'investissent peu dans les pistes liées aux modifications structurelles des pratiques. Pourtant, ces alternatives, lorsqu'elles sont mises en discussion, peuvent devenir attrayantes et susciter de l'intérêt.**

*La prospective produit des alternatives qui ont vocation à circuler dans différentes sphères*

Les travaux prospectifs sont d'abord destinés à un public cible avant leur publication. Le public peut être très large « auprès des ministères, auprès des secteurs industriels, auprès des associatifs, auprès des collectivités, auprès des bureaux d'études... » (P3) en fonction de la commande et de la volonté de faire circuler les prospectives produites. Ce choix détermine également où sont publiés les travaux et le niveau d'accessibilité du travail publié. Les futurs alternatifs peuvent être difficiles à appréhender et pour qu'une pluralité de parties prenantes puissent se les approprier, cela suppose qu'ils « soient extraits de leur seul langage technique » (P4).

Afin d'élargir ce public, il est possible de produire des prospectives participatives, au-delà d'un panel assez homogène constitué d'agences gouvernementales, d'ONG, ou d'organismes de recherche qui ont déjà éprouvé les méthodes de prospective à de nombreuses reprises (*Popper et al., 2009*). De plus en plus de prospectives incluent des acteurs de la société civile

et/ou des acteurs directement impliqués dans des sujets spécifiques. C'est par exemple le cas des prospectives agro-environnementales à des échelles locales qui engagent à la participation des agriculteurs, des associations ou même des riverains ([Rinaudo et al., 2013](#) ; [Delmotte et al., 2017](#)). Le fait d'intégrer davantage de participants moins sensibilisés à la pratique de la prospective entraîne des modifications dans la présentation de l'exercice, comme la sélection d'un langage approprié pour une communication facilitée, la sélection de facilitateurs ou d'animateurs pour les ateliers, le besoin de fournir d'autres types d'information... ([Pahl-Wostl, 2008](#)).

La prospective a également de l'influence sur le domaine de la recherche. Le but d'une partie des prospectives est de faire émerger des futurs alternatifs qui ne sont pas encore étudiés. La difficulté réside dans l'approche de faisabilité lorsque ces systèmes alternatifs ne sont ni éprouvés (spatialement ou temporellement) ni quantifiés car ces thèmes sont en dehors de l'espace de travail de la recherche.

Le champ de la prospective, en plus d'être une discipline académique à part entière, constitue également une source de nouveaux thèmes de recherche dans d'autres disciplines. La légitimité de ce champ dans le monde académique dépend de ces recherches dans les autres disciplines qui apportent les preuves quantifiées de la plausibilité des futurs imaginés ([Hideg, 2007](#)). En effet, pour rendre un travail de prospective robuste, il est nécessaire d'utiliser les outils conçus et fournis par la recherche de type méthodologique et/ou outils de quantification performants comme les modèles ([Mermet & Poux, 2002](#) ; [Elsawah et al., 2020](#)). Le travail de la recherche pour évaluer la faisabilité de systèmes alternatifs est complexe car il nécessite d'anticiper les changements de paradigme requis. Or, le fonctionnement de la recherche repose lui-même sur un système particulier qui limite la possibilité de dépasser ce paradigme ([Kläy et al., 2015](#)). Le champ de la prospective a la capacité d'apporter de nouveaux sujets de recherche disciplinaires, comme par exemple l'agroécologie pour nourrir l'Europe ([Poux & Aubert, 2018](#)) en agronomie ([Kerr et al., 2021](#)). Il y a également une remise en question profonde du fonctionnement de la recherche par la prospective sur la question disciplinaire, du fonctionnement en silo presque systématique des grands projets de recherche. Ce fonctionnement est en mutation car de plus en plus de projets académiques tendent vers des projets pluridisciplinaires, mais l'interdisciplinarité reste rare ([Kläy et al., 2015](#)), ce qui constitue une entrave à l'émergence d'une vision systémique d'un problème.

La prospective, et en particulier sa dimension diachronique via la planification a pour vocation de guider la prise de décisions de différentes organisations ([Iden et al., 2016](#)) a également une influence sur l'agenda politique et celui des institutions. Elle est également très utilisée par les institutions elles-mêmes, comme par exemple l'Ademe ([Thiriot, 2022](#)) ou les Agences de l'eau ([Houet et al., 2009](#)). Enfin, la question de la production d'un changement dans la société civile est peu documentée car difficile à mesurer.

**L'objectif de cette thèse est de co-construire avec les acteurs des images du futur tout en intégrant des notions sur les effets du changement climatique à long terme. L'idée est ainsi de faire circuler localement des représentations possibles du futur afin de débattre, à l'échelle locale, des aspirations pour ce territoire.**

**Cependant, ce travail se heurte à plusieurs défis liés à la quantification des scénarios. Ces défis impliquent de mener en parallèle différents axes pour renforcer la robustesse des**

**images produites : le choix du scénario climatique, l'amélioration des résultats sur les effets du stress hydrique et thermique encore mal modélisés par les modèles agro-hydrologiques, l'intégration de pratiques culturelles et de modes de vie alternatifs dans les modèles existants (e.g. effets de cadrage), ainsi que la complexité d'une approche interdisciplinaire. Ces enjeux font de cette thèse un véritable projet de recherche, intégré dans une dynamique transdisciplinaire et stratégique, car ses conclusions et méthodologies pourront être reprises par des institutions locales.**

*La prospective est un travail situé*

La prospective suppose une connaissance territoriale forte pour pouvoir comprendre les dynamiques temporelles et spatiales qui expliquent les raisons spécifiques à ce développement territorial. Il est donc nécessaire de récolter des données de différentes dimensions comme par exemple physico-chimique, politique, institutionnelle, ou sociale. Cette analyse implique de repérer les tendances lourdes qui vont aider à construire la dimension prévisionniste de la prospective (*Kunseler et al., 2015*). En plus du scénario tendanciel, cette analyse décèle les signaux faibles qui sont des éléments essentiels à la construction de scénarios alternatifs mais plausibles. L'étude des futurs alternatifs suppose donc un ancrage territorial qui se définit par ses dimensions spatiales et temporelles afin de lui reconnaître une identité spécifique et un statut. Dans le champ de la prospective, cette étude du passé n'est pas statique : elle est utilisée dans la perspective d'une mobilisation collective autour de l'identité de ce territoire qui devient une affaire commune. Il s'agit donc de faire émerger/ de construire un objet territoire afin de lui rendre ses dimensions collectives dans le seul but de penser sa transformation. Cette transformation est à son tour construite, collectivement, via la dimension temporelle par le biais de la planification de la trajectoire, et via la dimension spatiale par le biais de la modification de l'aménagement territorial (*Fourny & Denizot, 2007*). La prospective est également située dans le sens où il s'agit d'une question collective qui se réfère à un projet de société. Il est nécessaire de travailler les conditions collectives qui permettent d'atteindre un futur alternatif (*Thiriot, 2022*).

**Si ce projet de thèse a une vocation généralisable, il repose d'abord sur le travail réalisé autour du cas d'étude de la Souffel. L'objectif est d'identifier, à partir de ce cas, les éléments spécifiques au territoire étudié et ceux qui peuvent être transposés à d'autres territoires. Avant d'engager le travail collaboratif avec les acteurs, une phase préalable a donc été consacrée à l'étude du territoire : son évolution historique, ses acteurs et institutions, ainsi que ses particularités physiques et territoriales, présentées dans le [chapitre 2](#). De plus, l'aspect participatif de la thèse, qui propose de convier plusieurs parties prenantes afin de produire plusieurs images en 2070 est un moyen de travailler les conditions collectives pour construire un futur commun.**

### 1.3 Justification du choix de l'horizon

Une grande majorité des prospectives agro-environnementales de référence place l'horizon à 2050 (*Thiriot, 2022 ; Poux & Aubert, 2018 ; Couturier et al., 2016*). Cet horizon à moyen terme permet à la fois de discuter d'enjeux assez lointains et de rester dans un laps de temps intéressant pour que les parties prenantes s'y projettent. Dans cette thèse, l'horizon est placé un peu plus loin, en 2070. Le choix de placer le jalon à cette temporalité est lié à deux facteurs

: i) plus l'échéance est lointaine plus les conditions climatiques peuvent être sensiblement différentes des conditions actuelles, en fonction du scénario climatique choisi ; ii) c'est un moyen d'envisager des changements structurels et de se projeter dans des futurs sensiblement différents, malgré la difficulté de se projeter à cet horizon.

### *Variabilité des conditions climatiques*

La question climatique et particulièrement la prise en compte des effets du changement climatique comme facteur de mobilisation et de changement de pratique sont parmi les parties pris de ce travail. Le changement climatique est déjà ressenti assez fortement en Europe et en Alsace où l'on assiste à une augmentation générale des températures, de forts changements saisonniers, notamment du régime de précipitation et une augmentation des événements extrêmes ([Soubeyroux et al., 2023](#)). Si ces tendances sont déjà mesurées et ressenties, elles peuvent encore augmenter, si l'on se réfère à certains scénarios RCP réalisés par le GIEC (Figure 7). On remarque qu'au-delà de 2050, il y a une augmentation caractéristique des températures, notamment pour les scénarios RCP 4.5 (+1°C de réchauffement niveau global par rapport à 2024), 7.0 (+1,5°C de réchauffement niveau global par rapport à 2024) et 8.5 (+2°C de réchauffement niveau global par rapport à 2024). Ce dernier scénario est le scénario climatique choisi dans cette thèse. En effet, ce scénario climatique se base sur une absence de politique climatique, or aucune politique climatique d'envergure n'est encore menée au niveau international.

Les modèles agro-hydrologiques utilisés dans cette thèse sont sensibles à ces contrastes dans les tendances concernant les données climatiques et représentent ainsi les effets des variations climatiques sur les systèmes agricoles et hydrologiques ([Shiferaw et al., 2018](#)).

### *Contourner la question de la faisabilité par rapport à l'existant*

La faisabilité et la probabilité de réalisation d'une action lors d'exercices participatifs de prospective constituent une des principales limites à l'imagination de futurs alternatifs car ces

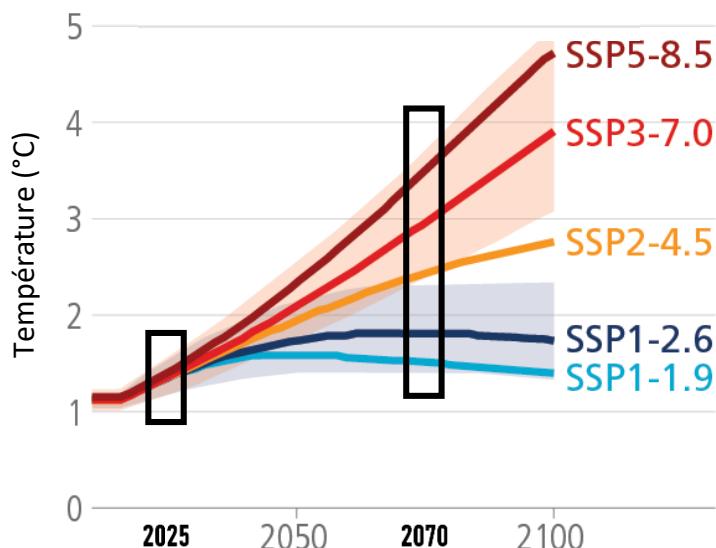


Figure 7. Augmentation des températures des différents scénarios RCP au 21<sup>ème</sup> siècle ([IPCC, 2023](#)).

conditions se basent sur des perspectives et des considérations actuelles. La question du long terme est centrale : elle montre que les relations entre les variables valables à un temps précis sont en réalité en constante évolution et peuvent ainsi être modifiées. Elle est construite par deux éléments : (i) une combinaison cohérente et robuste de ces variables qui diffère de celle existante et (ii) une adaptation fonctionnelle de ce nouveau système à une situation particulière (*Mermet & Poux, 2002*).

D'un point de vue conceptuel, un horizon à très long terme renforce l'effet de voile d'ignorance de la « position originelle » (*Rawls, 2005*). Cet effet de voile consisterait à instruire une vision future commune entre tous les supposés participants d'une prospective participative dans laquelle les participants sont amenés à mettre de côté leurs intérêts personnels afin de minimiser les différents conflits d'intérêts potentiels et de réussir à concevoir un futur désirable et égalitaire. Sur un plan plus pragmatique, on peut s'attendre à ce que les intérêts portés par les différentes parties prenantes constituent une limite à la construction d'un futur alternatif viable et que l'enjeu porté par le très long terme est un moyen de lisser un peu ces intérêts, car les dynamiques futures sont incertaines (*Andreeascu et al., 2013*). Cela renforce donc l'intérêt de travailler à des horizons très lointains. Néanmoins, il s'agit aussi d'un choix risqué.

#### *Limites de ce choix*

La question de l'horizon à long terme est questionnable dans les travaux relatifs à l'agriculture. La conduite de systèmes agricoles s'appuie sur des cycles courts, de l'ordre de l'année pour les cultures à la décennie pour les amortissements de matériel. La perspective de 2070 est donc assez éloignée et correspond davantage à une réflexion concernant le mode de transmission des exploitations. Les parties prenantes agricoles peuvent donc avoir du mal à se projeter dans cet horizon. De manière plus globale cet horizon est un moyen de se projeter dans une réalité future qui concerne les prochaines générations car une grande partie des participants ne seront plus vivante à cette date.

#### **1.4 Explication des critères normatifs**

Dans cette étude, nous avons opté pour une prospective normative, ce qui signifie que les participants doivent créer des récits cadrés par des objectifs particuliers. Ces récits, sont des récits de transformation car ils obligent les participants à imaginer de nouveaux systèmes agro-environnementaux (*Börjeson et al., 2006*). Ce choix a pour effet d'orienter idéologiquement la construction des récits en soutenant notamment une vision environnementaliste du système agro-hydrologique.

#### *La prospective normative pour appuyer la désirabilité*

La plupart des prospectives normatives, et c'est également le cas dans cette étude, établissent un monde futur afin d'atteindre des objectifs spécifiques qui sont désirables, comme par exemple la prospective de l'INRAE dont l'objectif est de supprimer l'utilisation de pesticides de synthèse à l'échelle européenne (*Mora et al., 2023*) ou le scénario TYFA dont l'objectif est de montrer que l'agriculture agro-écologique suffit à nourrir les européens (*Poux & Aubert, 2018*). Andreeascu et al. (2013) proposent une nouvelle caractérisation de la normativité dans la production de scénario qui repose sur l'atteinte d'un consensus entre différentes parties

prenantes représentatives d'un certain système concernant la désirabilité des critères fixés. Ainsi, comme c'est le cas dans cette étude, les différentes parties prenantes sont invitées à réfléchir autour d'objectifs communs qui ne sont pas appréhendés de la même façon pour tous. Le récit est donc créé autour d'un consensus général, après discussion de la signification des critères. Le but de ce type de prospective est d'orienter les actions vers un avenir commun désiré et de réaliser une planification des actions à mettre en œuvre pour aboutir à ce futur souhaitable (*Nikolova, 2014*). Mais ce futur souhaitable est finalement l'expression du consensus même, sur la base d'un partage de valeurs et des différentes étapes qui correspondent au futur désiré, aussi appelé « fondement constitutionnel » (*Andreeescu et al., 2013*), qui est le résultat de négociations et de jeux de pouvoir entre les différentes parties prenantes.

Les choix des objectifs dans les prospectives normatives sont un engagement en faveur de certaines normes et valeurs. La mobilisation des objectifs relève donc d'un positionnement idéologique (*Nikolava, 2014*) dont le cadrage se rapproche du style utopique. L'objectif est de construire un futur désirable, défini à partir de plusieurs critères qui servent de fondements. L'expérience participative comporte une démarche itérative, reliant les idéaux aux critères établis, tout en tenant compte des appréciations propres à chaque référentiel individuel. Andreeescu et al. (2013) ajoutent dans la définition proposée que la planification adoptant les objectifs discutés par les différentes parties prenantes afin d'obtenir un futur désirable est la composante essentielle de la normativité des scénarios. Cela signifie que la perspective d'actions est un élément constitutif de la démarche normative. Les critères élaborés au cours des ateliers visent à garantir une certaine viabilité du territoire sur le plan environnemental, ce qui peut également constituer un aspect central de la désirabilité.

#### *Utilisation de la prospective normative dans les perspectives agro-environnementales*

La prospective normative est beaucoup utilisée dans le domaine de l'environnement car elle fixe des critères environnementaux particuliers qui varient d'une prospective à l'autre. Les critères fixés dans les prospectives agro-environnementales sont relatifs aux externalités négatives produites par les pratiques agricoles conventionnelles sur l'environnement. La majorité des prospectives agro-environnementales (Tableau 2) fixe comme critère de nourrir une population en ajoutant une contrainte sur l'absence d'intrants synthétiques (engrais ou pesticides) afin de diminuer la pollution dans les différents compartiments environnementaux. Certains critères portent également sur la préservation de la biodiversité, ce qui est encore assez rare, du fait de la difficulté à quantifier cette préservation. La lutte contre le changement climatique est également mentionnée dans une partie de ces prospectives. Les critères normatifs des prospectives agro-environnementales sont majoritairement centrés sur des questions environnementales, notamment mesurées grâce à des flux. Elles traitent assez peu directement des questions de mise en œuvre politique. La faisabilité économique est parfois abordée en tant que résultante de la mise en œuvre des scénarios mais pas en tant qu'objectif normatif.

*Tableau 2. Présentation des objectifs normatifs et des modifications structurelles envisagées de prospectives agro-environnementales envisageant des modifications structurelles importantes.*

<b>Prospectives</b>	<b>Critères normatifs des scénarios</b>	<b>Modifications structurelles envisagées</b>
Ten Years For Agroecology (TYFA) <i>Poux &amp; Aubert, 2018</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nourrir l'Europe grâce à une agriculture agroécologique qui inclut le déploiement de prairies extensives et d'infrastructures paysagères</li> <li>- Aucune utilisation d'intrants synthétiques</li> <li>- Préservation de la biodiversité et des ressources naturelles</li> <li>- Lutter contre le changement climatique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification du régime alimentaire (moins riche et moins carnivore)</li> <li>- Evolution des systèmes et des pratiques agricoles</li> </ul>
Agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 <i>Mora et al., 2023</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune utilisation de pesticides chimiques</li> <li>- Garder une balance commerciale agricole positive en Europe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification du régime alimentaire</li> <li>- Politiques publiques cohérentes entre les politiques agricoles et alimentaires en Europe</li> <li>- Evolution des systèmes et des pratiques agricoles</li> <li>- Recherche agronomique orientée sur le développement de bio-intrants et d'outils de suivi</li> </ul>
Afterres 2050 <i>Couturier et al., 2016</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nourrir l'humanité</li> <li>- Lutter contre le changement climatique.</li> <li>- Préservation de la biodiversité et des ressources naturelles</li> <li>- Aucune utilisation d'intrants synthétiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification du régime alimentaire</li> <li>- Evolution des systèmes et des pratiques agricoles</li> <li>- Préservation des surfaces disponibles</li> <li>- Diminution des pertes et des surconsommations</li> </ul>
Scénario agroécologique Européen en 2050 <i>Billen et al., 2021</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boucler les flux géochimiques en Europe</li> <li>- Aucune utilisation d'engrais synthétiques</li> <li>- Aucune pollution au nitrate dans les masses d'eau</li> <li>- Garder une balance commerciale agricole positive en Europe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification du régime alimentaire</li> <li>- Evolution des systèmes et des pratiques agricoles</li> </ul>

En tant que prospective engageante, il est nécessaire qu'une partie des critères normatifs soumis soient davantage tournés vers des préoccupations raisonnables du monde agricole, mais aussi du monde environnemental.

#### *Explicitation des critères utilisés pour la prospective Trajectoires*

La conception des images du futur de l'agriculture sur le territoire de la Souffel en 2070 par les différentes parties prenantes est soumise à la consigne de respecter certains critères normatifs. Ces critères sont les suivants :

- 1/ Le futur système agricole doit être résilient au changement climatique**
- 2/ Le futur système agricole doit être moins polluant qu'actuellement**
- 3/ Le futur système agricole doit être désirable professionnellement**
- 4/ Le futur système agricole doit être viable économiquement**

Ces critères normatifs visent à répondre à des préoccupations de différents ordres : environnementaux, économiques et sociaux. Le critère de résilience au changement climatique suppose (i) la mise en place d'un système plus adapté aux nouvelles conditions climatiques pour le rendre moins vulnérable (choix de cultures plus résistantes à la chaleur et requérant moins d'eau, moins d'irrigation en été, adaptation des itinéraires techniques aux variabilités des températures et des précipitations et aux événements extrêmes) et (ii) la mise en place d'un système qui émet moins de pollution pour limiter la contribution de l'agriculture sur le territoire à l'accélération du changement climatique et au dépassement des limites planétaires ([Crippa et al., 2021](#) ; [Richardson et al., 2023](#)). Le critère de la diminution de la pollution est majoritairement axé ici sur la pollution de l'eau, mais peut également être instruit sur les sols ou sur l'air. Cette pollution concerne particulièrement le devenir des intrants (engrais et pesticides). Une diminution importante des pollutions suppose une diminution des pollutions à la source et donc un changement majeur au niveau des pratiques agricoles ([Poux & Aubert, 2018](#) ; [Couturier et al., 2016](#)). Le critère de la désirabilité professionnelle est largement évoqué par la profession agricole, notamment sur la question du non renouvellement de la population agricole par les nouvelles générations ([Hervieu & Purseigle, 2022](#)). Il s'agit donc également de réfléchir collectivement à quels peuvent être les pratiques à faire évoluer pour que ce métier redevienne attractif. Enfin, le critère de viabilité économique repose sur la proposition d'imaginer des systèmes agricoles profitables dans un système économique potentiellement très différent de l'existant. Les questions de désirabilité et de viabilité économique sont assez souvent évoquées conjointement. Nous proposons de les aborder différemment en supposant que la désirabilité professionnelle comporte d'autres composantes que la viabilité économique comme par exemple les conditions de travail et de vie.

### 1.5 Application du principe de frugalité

Le principe de frugalité s'applique à la dimension prospective car la construction de scénarios robustes et cohérents demande un temps considérable. En effet, tous les développements initialement envisagés dans le cadre de ce projet de thèse n'ont pas pu être développés. C'est le cas pour la construction de « scénario ». Un scénario en prospective se définit par la combinaison de deux dimensions ([Julien et al., 1970](#)) :

- **Synchronique**, qui décrit des variables d'un système à un moment particulier qui doivent être mises en cohérence les unes et les autres afin de définir un état viable.
- **Diachronique**, qui décrit la manière dont les événements s'enchaînent et les relations de causalité entre ces événements qui aboutissent à un état.

Cette étude ne développe que la dimension synchronique, c'est-à-dire une image du territoire en 2070 et non l'ensemble des événements qui, mis bout à bout, rendent possible cette transition. Néanmoins, elle s'ancre dans l'historicité du territoire et prend donc en compte la trajectoire passée, mais pas l'évolution entre aujourd'hui et les années 2070. Le temps imparti pour la construction d'une dimension synchronique est déjà considérable, ce qui a entraîné

une minimisation du développement de la dimension « trajectoires » et de leur présentation aux acteurs.

Plusieurs termes sont utilisés dans cette étude afin de définir les différents stades de développement de la prospective qui sont définis ici :

**Dires d'acteurs** : le terme intègre les verbatims et ses reformulations issues des différents ateliers.

**Image** : mise en cohérence approfondie des dires d'acteurs et renforcement de sa robustesse par le biais d'étapes successives : (i) affirmation des critères normatifs de construction des images, (ii) recours aux dires d'experts et à des prospectives spécifiques pour compléter et (iii) contextualisation de cette réalité par la constitution d'un système agricole, politique, social, environnemental et économique approprié qui la rende crédible. L'image contient une dimension récit, et une dimension jeux de données.

**Jeu de données** : traduction et adaptation du récit associé à l'image en donnée d'entrée de modèle en prenant en compte les effets de cadrage des modèles (qui ne sont pas capable de simuler des dispositifs pas encore existants imaginés dans le cadre de la prospective) et aux contraintes usuelles des modèles limités car développés dans un contexte particulier.

## 2. Le mode de participation choisi

Une ambition significative de la construction d'une prospective engageante est qu'elle puisse intégrer activement des acteurs. Cette partie examine les défis et les méthodologies associés à la participation des parties prenantes dans les exercices de prospective et de planification environnementale. Les principaux objectifs de ce travail sont de créer des espaces de dialogue et de réflexion collective avec une grande diversité de parties prenantes. Les différentes méthodes de délibération utilisées lors de ce travail sont décrites et justifiées ici.

### 2.1 Historique de l'intégration de la participation dans les dispositifs d'action publique

L'émergence de la participation politique est ancrée dans les mobilisations collectives et les différents mouvements sociaux qui se mettent en place en réponse à un sentiment de non représentativité des citoyens par la classe politique. La multiplication et l'internationalisation des mobilisations dans les années 1960 font émerger le concept de **participation** qui se réfère à la volonté de l'engagement des citoyens dans les sphères décisionnelles afin de porter des intérêts particuliers qui ne sont pas écoutés par les politiques (*Pateman, 1970*). Suite à ces mouvements, plusieurs espaces politiques s'ouvrent, notamment au niveau local, comme des « comités de quartiers » ou des « forums de discussion sur la gestion locale » (*Gaudin, 2013*), particulièrement dans les projets d'urbanisme et d'aménagement du territoire. L'agenda politique est progressivement soumis à des obligations de participation, d'abord popularisé sous la forme de droit à l'information ou d'enquêtes publiques dans les années 1980 qui peuvent s'ouvrir, de manière encore très rare à des pouvoirs décisionnels conférés aux participants. Les mobilisations collectives portent souvent des revendications sociales ou d'opposition à la guerre mais les années 1960 voient également émerger des revendications environnementales. Ainsi, les politiques de l'environnement et celles de la participation

deviennent interdépendantes ce qui donne naissance à la « démocratie environnementale » (*Barbier & Larrue, 2011*). Depuis, la participation du public s'est largement institutionnalisée par le biais d'obligation constitutionnelles à des concertations préalables dans le « code de l'environnement » mais également à la création de la Commission Nationale du Débat Public (CNDP) en 1995 qui fait suite à la Loi Barnier et vise à renforcer la démocratie participative dans le champ de l'environnement sur des projets publics ayant des effets importants sur l'environnement.

## 2.2 Enjeux méthodologiques et portée de la participation dans cette thèse

### *Principaux enjeux méthodologiques en participation*

La participation des acteurs locaux à la production de scénarios permet la prise en compte les savoirs locaux et tacites qui enrichissent et complètent les savoirs scientifiques (*Raymond et al., 2010*), voire apportent une vision nécessaire, fondamentale et indispensable aux travaux scientifiques, comme le suggère la « *post-normal science* » (*Funtowicz & Ravetz, 1993*). Cela met aussi en exergue les difficultés subies au quotidien d'un certain mode de vie en les intégrant directement à un travail prospectif particulier (*Raymond et al., 2010*). Elle peut également conduire à un « *empowerment* » des acteurs, ce qui correspond à une augmentation de leurs connaissances qui peut amplifier les capacités de mobilisation d'un collectif et sa participation active à des décisions politiques. La participation est un moyen de donner plus de robustesse aux scénarios et de préparer plus efficacement leur mise en place (*Reed et al., 2013*). Enfin, la question de la participation est aussi une question de démocratisation, notamment du champ même de la prospective en incluant un large éventail de participants dans la possibilité de réfléchir à un futur possible partagé par des visions très différentes (*Ramos et al., 2019*).

Si l'on examine les questions méthodologiques liées à la participation des acteurs dans les exercices de prospectives, on constate trois problématiques récurrentes (*Barendreg et al., 2024*) :

**Qui sont les participants ?** Les participants sont sélectionnés en fonction de la méthode participative adoptée : panel d'expert, atelier de groupe (*focus group*), jury de citoyens, simple consultation... Les participants dans les études sont presque systématiquement décrits comme des « parties prenantes », du « public », des « experts » et des « décideurs politiques, comme des élus » (*Barendreg et al., 2024*). La plupart du temps, les participants sont choisis selon leurs fonctions, ce qui augmente les biais dans les exercices de prospective du fait des inégalités préexistantes : on retrouve donc en majorité des hommes plutôt dans la cinquantaine, issus de classes socio-économiques moyennes à élevées. Les participants sélectionnés sont très rarement des populations discriminées ou peu insérées dans la société (*Mitlin, 2021*). Le critère de représentativité implique que les participants doivent être choisis de manière cohérente avec la question controversée étudiée et caractériser le contexte local (*Reed et al., 2008*). De plus, l'identification des parties prenantes est un moyen de répertorier les intérêts communs et les potentiels conflits entre les participants pour définir plus clairement le système et ses limites (*Frooman, 1999*).

La question de l'équité entre les participants qui consiste à ce que chacun puisse participer de manière équitable aux discussions (*Chess & Purcell, 1999*) n'est pas souvent abordée dans les prospectives. Elle est néanmoins traitée par les chercheurs en théorie et ingénierie de la participation, notamment sur l'accès équitable au débat par le public afin de tendre vers un modèle délibératif qui débouche sur un accord pondéré (*Berlan-Darqué & Mermet, 2009*). Afin de contrôler une prise de parole égalitaire et de sécuriser les participants qui en ont besoin, il peut être nécessaire de faire appel à un facilitateur qualifié (*Reed et al., 2008*).

**Qu'est-ce que l'on attend des participants dans les exercices de prospectives ?** Dans la majorité des cas, on attend des participants une certaine expertise à une échelle spatiale donnée qui est relative à des pratiques professionnelles par exemple. La participation dans le domaine environnemental s'est progressivement institutionnalisée (*Barbier & Larrue, 2011*) jusqu'à devenir un impératif, notamment dans la législation sur l'eau. Le processus participatif n'est cependant pas homogène en fonction des projets, faisant apparaître un « paradoxe de la participation » (*Barbier & Larrue, 2011*) : plus les enjeux sont faibles, plus les voix des parties prenantes sont considérées et inversement.

**Quel est le niveau d'implication des participants ?** Il existe beaucoup de littérature concernant le niveau d'implication des parties prenantes dans le processus participatif (*Arnstein, 1969* ; *Stirling, 2006* ; *Mitlin, 2021*). Celui-ci oscille entre un état de non-participation, c'est-à-dire qui ne délivre pas de pouvoir de décision aux participants, et l'état d'« empowerment », qui lui, assure au citoyen un contrôle sur les décisions politiques issues du processus participatif. Ce niveau d'implication peut concerner l'ensemble des étapes lorsqu'il est réfléchi en tant que processus co-décisionnel (*Daniell et al., 2012* ; *Hassenforder et al., 2020*) : de la définition du problème à la constitution du groupe de participants eux-mêmes à la prise de décision finale. Une autre méthode, la co-construction, consiste à faire travailler collectivement les acteurs réunis afin de construire un projet sur lequel ils ont peu de prise quant aux décisions finales.

Cette thèse vise à engager les acteurs du monde agro-hydrologique dans un processus de modification des pratiques, notamment en les impliquant dans le travail prospectif. En effet, impliquer davantage les agriculteurs dans la réflexion autour des outils requis pour changer de modèle agricole permet une meilleure adhésion à ces dispositifs (*Defrancesco et al., 2008* ; *Barataud et al., 2014*). Dans ce travail, la méthode suivie est celle de la co-construction au cours d'ateliers de groupes focalisés (*Kitzinger, 1995* ; *Morgan & Krueger, 1998*). Les acteurs sélectionnés pour une discussion collective sont réunis afin d'apporter des données qualitatives sur un sujet défini et d'apporter une réelle légitimité aux savoirs tacites et à l'élaboration de solutions adaptées aux situations vécues (*Leclerc et al., 2011*). Le fait de faire référence aux vécus et aux expériences propres des acteurs fait émerger des considérations sociales qui peuvent mener à une volonté de changer les pratiques (*Hallberg-Sramek et al., 2023*).

#### *Les exercices de participation comme espace de dialogue entre parties prenantes*

Les exercices de participation en prospective, à l'instar des exercices institutionnels de planification environnementale (SAGE, CLE...) s'ouvrent à une pluralité de parties prenantes, principalement des « non-experts » (*Nikolova, 2014*) qui sont présents à différentes étapes de

gouvernance, i.e l'identification des problèmes, la proposition de moyens pour les résoudre et l'évaluation de l'efficacité de la résolution. Le dialogue entre les différentes parties prenantes repose sur un partage d'expérience individuel qui est une ressource primordiale lors des discussions (*Borch, 2013*). Ce partage d'expérience, lorsqu'il diffère d'une approche usuelle, peut démontrer la faisabilité du changement de pratique. La diversification des visions du monde dans les groupes participatifs est une manière de faire vivre le pluralisme qui guide vers une prise de décision collective soumise au compromis et à la négociation (*Rawls, 2005*). La représentativité d'une pluralité d'opinion est encore une fois centrale dans ce processus de dialogue en prospective (*Borch, 2013*) et elle l'est d'autant plus qu'il est possible de mettre à distance les intérêts des participants pour que le dialogue repose sur la diversité de visions morales présentes (*Andreescu et al., 2013*). Or, les participants conviés à ces exercices de participation, mêmes élargis, ont souvent des points de vue similaires ce qui est un réel obstacle à une prise en compte systémique des besoins. A fortiori, cela a pour effet de rendre invisibles certains discours, savoirs ou pratiques, notamment ceux des personnes les plus précaires (*Cook et al., 2013*). En effet, c'est la confrontation de points de vue incompatibles qui mène à une véritable approche démocratique (*Nikolova, 2014*). Les exercices participatifs en prospective sont également un moyen de faire discuter les parties prenantes sur les failles du système actuel et d'exprimer les besoins réels ou les désirs liés à leurs pratiques (*Borch, 2013*).

**Dans ce projet de thèse, plusieurs choix méthodologiques ont été faits pour favoriser le pluralisme : d'une part, en constituant des panels hétérogènes, et d'autre part, en offrant la possibilité de concevoir différentes images représentant des futurs variés, qui ont ensuite été discutés lors du dernier atelier.**

#### *Participation et acceptabilité du changement de pratique*

La notion d'acceptabilité a émergé à une période où le doute en la parole des scientifiques et de l'action publique a augmenté, parallèlement à l'émergence des dispositifs participatifs. L'acceptabilité sociale est définie comme « une évaluation collective » s'opposant ainsi à des positionnements personnels (*Gendron, 2014*). Cette adhésion suppose que l'opinion collective juge acceptable un projet et qu'elle comprenne l'intérêt public de celui-ci, ainsi que ses bases techniques au cours d'un dialogue entre les porteurs de décision et l'ensemble des acteurs concernés par le projet. Néanmoins, ce terme est souvent employé de manière dérivée afin d'apaiser les relations publiques (*Batelier, 2015*) et de domestiquer la levée d'une contestation (*Neveu, 2011*). Ainsi, une partie des processus participatifs reposent sur l'« acceptologie » (*Chateauraynaud, 2011*) qui est le fait de faire accepter, et non de débattre afin d'obtenir une vision partagée dans le cadre d'une concertation entre chercheurs et acteurs engagés dans des processus dits participatifs. Ces discussions se limitent à chercher une solution à la problématique sans interroger les racines du problème ni la manière d'aboutir à une décision collective sur ce dernier (*Noury et Seguin, 2021*).

Afin d'éviter cet écueil, il est nécessaire de renforcer la pluralité des participants pour nourrir le consensus basé sur l'intérêt général (*Gendron et al., 2016*). L'acceptabilité passe par une analyse critique d'une situation qui vient nourrir un dialogue entre les différentes parties prenantes impliquées dans un processus délibératif qui peut aboutir à différents résultats : l'acceptation ou la contestation d'une situation, une modification des rapports sociaux qui

entraîne une évolution des rapports de force concernant les décisions prises sur un territoire ([Barbier, 2021](#)). En effet, l'acceptabilité sociale est un processus collectif qui requiert des discussions et sa construction est fondée sur la possibilité d'apposer des ajustements plus ou moins profonds à un projet, une situation... Il est également nécessaire d'associer les sciences humaines et sociales aux sciences techniques en amont des projets, afin d'étudier les fonctionnements organisationnels, institutionnels et politiques, dans le but de cadrer le changement et d'améliorer son acceptabilité ([Saujot et al., 2022](#)), plutôt que d'adopter une démarche d'acceptologie. L'interdisciplinarité est une clé de voûte à la mise en place de nouveaux systèmes car ils nécessitent des changements dans un ensemble de domaines relatifs à un sujet particulier : si l'on souhaite modifier les régimes alimentaires, c'est un ensemble de secteurs et de pratiques qui sont réformés en termes techniques et organisationnels (nouvelles pratiques agronomiques, nouveaux débouchés, nouvelles politiques agricoles, nouveaux modes de communications...).

**Ce projet de thèse a pour objectif de mobiliser les acteurs locaux afin d'identifier (i) les formes d'agriculture futures jugées désirables et (ii) les moyens disponibles à l'échelle locale pour les mettre en œuvre, dans le but de faire face aux effets déjà perceptibles du changement climatique. L'acceptabilité d'un changement de pratique par ces acteurs repose ainsi directement sur leur besoin de construire un cadre collectif pour accompagner cette transition.**

#### *Outiller un dialogue afin de minimiser les discours réfractaires au changement*

Il est établi que les systèmes agricoles conventionnels sont responsables d'une partie majeure de la pollution contenue dans les sols et dans l'hydrosystème ([Schwarzenbach et al., 2010](#)). Il est également établi que les politiques agricoles et le marché agricole incitent à une forte productivité et donc à l'usage d'intrants, de mécanisation, à l'accaparement d'une grande partie des ressources en eau afin de rester rentable ([DeBoe, 2020](#)). Les exercices participatifs en prospective dans le domaine agro-environnemental ont très souvent pour but d'aborder le sujet environnemental et de réfléchir à comment faire évoluer ces pratiques vers des solutions plus vertueuses pour l'environnement ([Tournebize et al., 2017](#)). C'est également un retour notable des prospectivistes interrogés dans le cadre du stage portant sur les déterminants principaux des trajectoires de transition des agrosystèmes dans un corpus de prospectives. Néanmoins, on retrouve des réactions récurrentes, de la part d'une pluralité de parties prenantes, qui résistent à ce changement en opposant systématiquement des contre-arguments au besoin de changement de pratique (Figure 8). On peut regrouper ces discours qui ont pour but de retarder la transition sous quatre catégories majeures que sont (i) la désignation d'une responsabilité externe qui empêche tout changement de système, (ii) les contre-arguments qui visent à démontrer le caractère irréalisable d'un nouveau système, (iii) les contre-arguments qui mettent l'accent sur les inconvénients du nouveau système et (iv) les actions qui visent à déployer des solutions court-termiste et palliatives. Ces discours proéminents empêchent de discuter des solutions viables qui pourraient être envisagées ([Lamb et al., 2020](#)).

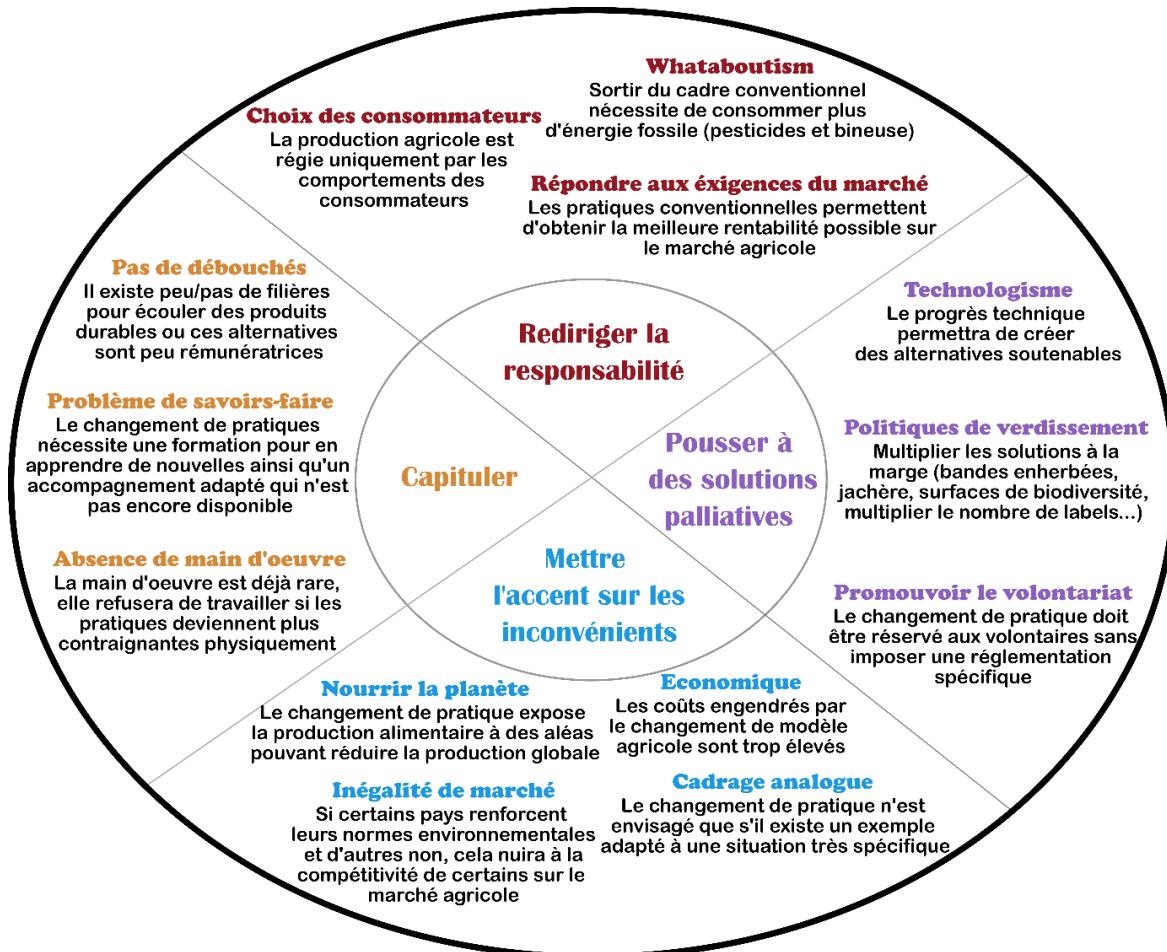


Figure 8. Classification des discours les plus fréquents qui constituent un frein au changement de pratiques agricoles (inspiré de Lamb et al., 2020).

La principale question est de savoir comment contourner l'ensemble de ces discours et comment outiller le dialogue afin de favoriser des échanges qui mènent à l'élaboration de nouveaux systèmes soutenables. Il existe différents outils favorisant les échanges sur des sujets environnementaux, comme des jeux sérieux et de la modélisation participative ([Tournebize et al., 2017](#)).

Dans ce projet de thèse, le dialogue s'appuie principalement sur des ateliers participatifs visant à imaginer le territoire à l'horizon 2070, cadre par des critères normatifs qui encouragent une réflexion environnementale, basée sur les effets du changement climatique.

### 2.3 Choix de la méthodologie participative

#### Choix de la méthode de travail participatif

Il existe une multitude de méthodes de travail qui consistent à « faire du participatif ». La particularité des méthodes participatives est que le débat est encadré afin de dévier du temps à un sujet précis, parfois jusqu'à une prise de décision collective. Chaque méthode permet d'atteindre un certain degré d'engagement des participants en fonction du cadre du projet. Le Tableau 3 classe différentes méthodes en fonction des principales caractéristiques et des critères pour que la méthode corresponde à différents stades de participation, classés du plus

participatif au non participatif : l'empowerment, soit le pouvoir effectif des citoyens ; le tokenism, soit une coopération symbolique ; et le dernier stade qui ne peut pas être considéré comme de la participation ([Arnstein, 1969](#)). Il est aussi possible de combiner ces méthodes au cours du processus participatif en fonction de l'objectif souhaité (récolte d'information, décision collective, délimitation des objectifs...).

*Tableau 3. Caractéristiques principales vis-à-vis de la participation des principales méthodes de participation.*

Méthodes	Caractéristiques	Empowerment	Tokenism	Pas de participation
Ateliers groupes focalisés (méthode qualitative de recueil de données menée auprès d'un public ciblé) <a href="#">Delmotte et al., 2017</a> ; <a href="#">Allain et al., 2020</a>	- Différentes parties prenantes réunies autour d'un sujet - Représentatifs des enjeux locaux - Objectif de trouver un consensus autour de la problématique	- Décision finale et son application réalisée par les parties prenantes  - Augmentation du niveau général de connaissance	- Décision finale réalisée par une instance extérieure qui a pris en compte les avis des participants	- Décision finale réalisée par une instance extérieure qui sans prendre en compte les avis des participants
Convention citoyenne / Conférence de consensus / Jury citoyen  <a href="#">Courant, 2020</a>	- Jury constitué de manière aléatoire (diversité et représentativité aléatoire) - Prise de décision basée sur des arguments scientifiques (experts, rapports...) - Processus long			
Enquête d'opinion publique & entretiens	- Large public potentiel - Questions posées sur un sujet précis - Pas d'interaction entre les participants			
Consultation publique	- Objectif d'informer le plus grand nombre possible de citoyen sur un sujet particulier		- Intégrer des observations et propositions formulées dans la décision finale portée par une instance extérieure.	

Nous avons choisi de combiner plusieurs méthodes. Dans un premier temps, plusieurs entretiens ont été conduits avec des acteurs ciblés, ce qui a permis d'organiser les ateliers. Lors de cette seconde étape, nous avons choisi la méthode des groupes focalisés, car elle favorise le dialogue entre les différents participants et repose entièrement sur cette dynamique de groupe ([Merton, 1987](#)). Elle est particulièrement utilisée pour connaître les opinions des participants ([Wilkinson, 1998](#)). Il s'agit également d'un format idéal pour exposer conjointement les savoirs locaux/profanes et les savoirs scientifiques et de les discuter. De plus, la méthode des groupes focalisés est un moyen de produire des délibérations collectives et de révéler les conflits existants et potentiels avec un changement de situation. C'est un moyen de réunir une grande diversité d'informations sur le contexte local tout en produisant une délibération partagée ([Stratigea et al., 2013](#)). En prospective, elle est largement utilisée car elle peut apporter les informations nécessaires au processus de création de scénario, particulièrement à l'échelle locale ([Stratigea et al., 2013 ; Delmotte et al., 2017 ; Allain et al., 2020](#)). Il est possible de regrouper un échantillon représentatif des dynamiques locales, tout en étant suffisamment restreint pour favoriser des discussions approfondies. Cette méthode offre ainsi une vision d'ensemble et peut favoriser la généralisation des résultats issus des différents ateliers à un ensemble de territoires.

#### *Format des ateliers*

Plusieurs ateliers distincts ont été nécessaires pour présenter les attentes et fournir les informations essentielles à la création des futures représentations. Dans la littérature, la séparation des ateliers est souvent justifiée par des contraintes de temps, le besoin d'assimilation progressive des connaissances, ou la nécessité de produire des résultats de modélisation à présenter aux participants ([Delmotte et al., 2017 ; Allain et al., 2020 ; Rinaudo et al., 2013](#)). Dans cette étude, trois ateliers ont été organisés :

Le premier atelier a pour objectif d'établir un diagnostic partagé des effets du changement climatique sur les pratiques agricoles locales. Une large part de cet atelier est consacrée à la présentation des données climatiques et à une discussion collective sur les effets du changement climatique à l'échelle locale.

Le deuxième atelier se concentre sur la construction d'images pour le territoire à l'horizon 2070. Il s'agit de créer des images normatives basées sur les dynamiques agro-hydrologiques sous l'effet du changement climatique, en évaluant la durabilité du système actuel. La réalisation de ce diagnostic partagé lors du premier atelier est essentielle pour cette étape, dans la mesure où la résilience des systèmes est un des critères normatifs imposé à la création des images. Les participants sont répartis en groupes de trois à quatre personnes, et l'atelier repose sur cette dynamique de groupe, avec des présentations collectives en fin de session.

Le troisième et dernier atelier, organisé conjointement avec le syndicat de l'eau local, le SDEA, et l'Agence de l'Eau dans le cadre du Contrat Territoire Eau et Climat (CTEC)<sup>2</sup>, vise à encourager l'adaptation des pratiques face au changement climatique. Cet atelier, qui intervient après la

---

<sup>2</sup> La mise en place commune de cet atelier découle à la fois de la difficulté de rassembler à plusieurs reprises les acteurs agricoles et institutionnels, nécessitant de mutualiser ce moment et du fait que ce troisième atelier était conçu pour favoriser une réflexion collective sur les actions envisageables à court terme et sur les moyens dont disposent les institutions locales pour accompagner le changement de pratiques, un point central abordé dans le CTEC.

modélisation des différents récits, est l'occasion de présenter les résultats aux participants. Une grande partie de la session est dédiée à la discussion de ces résultats, suivie d'un travail en groupe pour identifier des actions à court terme en vue de tendre vers les images envisagées.

## 2.4 Constitution des panels

### *Le choix des participants*

Le choix des participants dans un contexte situé repose sur plusieurs méthodes, comme des entretiens et des enquêtes préliminaires qui nous renseignent sur les dynamiques locales et les personnes qui les investissent ([Prell et al., 2007](#)). Ce travail est cadre autour de la question agro-hydrologique. Les participants choisis sont donc reliés à cette thématique particulière et l'enjeu principal du choix des participants est de représenter une grande diversité de points de vue existants dans ce système ([Andreeescu et al., 2013](#)). La première étape dans ce travail est de s'entretenir avec des représentants de terrain ciblés des institutions locales sur des questions agro-environnementales. Ces entretiens permettent de (i) retracer l'historique des mesures mises en place sur le territoire, (ii) relever les mécanismes favorables ou défavorables au changement de pratique, (iii) identifier les personnalités et groupes influents dans ce système et (iv) confronter les différents points de vue des personnes interrogées en fonction de leurs institutions initiales. Ainsi, à la fin de ces entretiens, on distingue plusieurs parties prenantes constitutives du système agro-hydrologique (Figure 9).

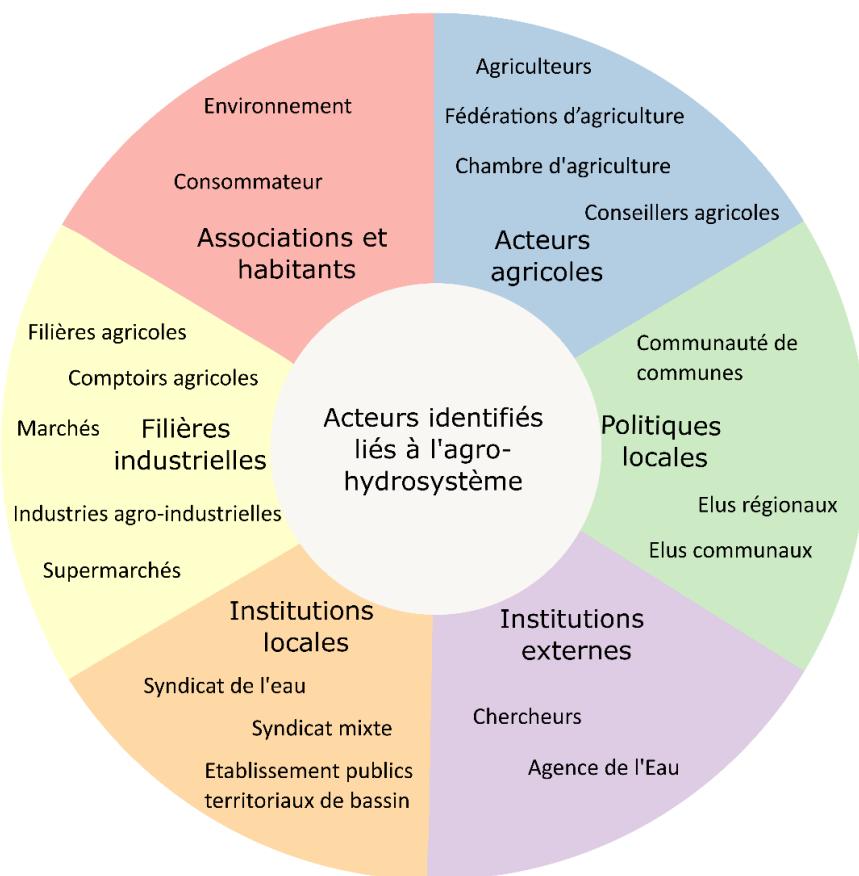


Figure 9. Différents acteurs identifiés liés à l'agro-hydrosystème.

## *Séparation en panels*

Plusieurs panels ont été constitués dans ce travail :

- Un panel « homogène », constitué seulement d'agriculteurs
- Un panel hétérogène, associant les autres parties prenantes identifiées.

Ce choix est assez rare dans la littérature où l'ensemble des parties prenantes sont réunies pour aboutir à une discussion collective sur les scénarios puis tenter de créer un consensus entre tous les intérêts réunis (*Delmotte et al., 2017 ; Ganivet, 2023 ; Hatzilacou et al., 2007*). Dans cette étude, nous tentons de réunir un ensemble de partie prenante identifié mais également de laisser à chacune l'espace nécessaire à la formulation d'un futur désirable. C'est particulièrement le cas concernant le groupe des agriculteurs qui peut ressentir une certaine méfiance ou des difficultés à argumenter face à des experts lors d'ateliers de construction de scénarios (*Rinaudo et al., 2013*). Cela peut être dû au fait que les agriculteurs sont peu familiers avec les exercices de prospective, contrairement aux experts, en raison de la popularisation de ces pratiques au cours des dernières années. Les agriculteurs seront également plus aptes à parler des différentes problématiques auxquelles ils sont confrontés sur des questions très pratiques entre eux afin de discuter de points techniques, difficiles à aborder dans des groupes mixtes.

Le panel animateur est quant à lui un panel hétérogène composé majoritairement d'agents de terrain et issu de différentes institutions : chambre d'agriculture, syndicat de l'eau, métropole, élus issus du monde agricole, conseillers agricoles en agriculture conventionnelle et biologique. Il est difficile de réunir certains types d'acteurs, notamment liés aux filières industrielles. En effet, ces acteurs ont été contactés mais n'ont pas désiré participer aux ateliers.

Ces différents panels sont séparés lors des deux premiers ateliers. Ils se réunissent finalement lors du dernier atelier, consacré à la présentation des images du territoire en 2070, afin de discuter collectivement des différentes représentations et de leurs implications pour chaque partie prenante.

## *Le recours à un facilitateur*

Le rôle du facilitateur est un atout précieux pour la construction et la conduite des ateliers (*Etienne et al., 2011*). Il permet en effet à la fois de mettre en place des ateliers adaptés et accessibles aux participants dans un temps imparti mais également de stimuler les interactions lors de l'atelier (*Rowe & Frewer, 2000*). Le recours à un facilitateur est donc nécessaire pour coordonner les approches ascendantes et descendantes (*Jones, 2001*). Afin de réaliser ces ateliers, un facilitateur, Benoît Labbouz (ingénieur de recherche à AgroParisTech), a été contacté. Il a travaillé en particulier sur :

- La construction des ateliers en termes de :
  - Stabilisation des objectifs et insertion dans un exercice participatif
  - Conception des différentes phases de l'atelier (choix de la forme, idées de contenus à distribuer aux participants et création de certains d'entre eux)
  - D'organisation (déroulé et temps consacré de chaque phases)

- L'animation des ateliers comprenant

- La présentation du déroulé des ateliers
- La clarification d'arguments et de concepts clés
- La clarification des consignes et la gestion du temps

## 2.5 Application du parti pris de frugalité

Le parti pris de frugalité a eu des effets sur les ateliers et le travail effectué lors de cette thèse. Ces effets sont de différents types :

(i) Le temps alloué à chaque atelier

La frugalité est pensée également vis-à-vis de la variable de temps. Le but de cette méthode est de concevoir des ateliers courts pour favoriser la participation le plus large possible. Il existe en effet une disparité importante entre les parties prenantes en fonction de leur profession : la plupart des agents institutionnels, des filières agro-alimentaires et des employés agricoles peuvent intégrer ce type d'exercice dans leur emploi du temps de travail tandis que ce n'est pas du tout le cas des agriculteurs et des habitants. Un format court est donc essentiel pour garantir une participation équitable entre les parties prenantes.

(ii) Le format court entraîne un long travail en interne

Le format court des ateliers, notamment de production d'image du territoire en 2070, implique de devoir retravailler intensément les dires d'acteurs, de les contextualiser afin de les transformer en images. Ce travail veille à garder une traçabilité des changements et une fidélité aux dires d'acteurs, ce qui rend le processus d'autant plus long. La partie modélisation est également assez longue : afin de représenter les systèmes agricoles, le choix des modèles s'est axé sur des modèles intégrés. Bien qu'utiles et adéquates, ces modèles sont complexes ([Hamilton et al., 2015](#)) et requièrent un temps long en ce qui concerne leur prise en main, la conception des données d'entrées, les différents tests de calibration et de validation, etc.

(iii) L'ajustement de la durée a des conséquences sur le format des ateliers

Le choix de concevoir des ateliers courts influence directement leur format, notamment en ce qui concerne la répartition du temps entre les différentes activités (présentations scientifiques, travaux de groupe et discussions collectives). Nous avons essayé de maximiser le temps alloué aux productions des participants et à leurs discussions dans le cadre des ateliers. Le travail de modélisation et de confortation des récits a également conditionné les ateliers en imposant une coupure longue entre le deuxième et troisième afin d'obtenir les résultats à présenter aux participants. En effet ces deux ateliers ont été séparés de plus d'un an, ce qui a eu pour effet un manque de suivi des participants.

## 3. Des modèles agro-hydrologiques pour accompagner la prospective

La quantification, majoritairement par le biais de la modélisation, joue un rôle central dans l'aide à la prise de décision pour des systèmes complexes, notamment en agriculture et en

hydrologie. La quantification constitue un argument d'autorité qui a des effets importants sur la manière dont les discussions se structurent et sur d'autres aspects comme la conception des politiques publiques. Cette partie montre que les modèles sont des outils de choix pour représenter l'évolution des systèmes, bien qu'il existe encore de nombreuses incertitudes en modélisation. Les modèles agro-hydrologiques, MAELIA et SWAT+, sont des outils appropriés, bien que limités, pour simuler les cycles biogéochimiques et hydrologiques en intégrant les pratiques agricoles et le forçage climatique, parmi l'ensemble des modèles existants.

### 3.1 L'émergence de la modélisation intégrée

L'usage de la modélisation en prospective a émergé afin de caractériser quantitativement avec précision des évolutions environnementales. Le Club de Rome à l'origine du rapport sur Les limites de la croissance (*Meadows et al., 1972*) a été le premier à utiliser des méthodes prospectives systémiques issues du domaine stratégique militaire. Le premier modèle créé dans ce cadre, le modèle WORLD dont les variables et leurs interactions sont schématisées sans lisibilité mais permet d'obtenir une vue d'ensemble du modèle (Figure 10). La Figure 10 illustre bien la complexité des modèles conçus, par le nombre de variables (quadrilatères) et de paramètres (ronds) intégrés au modèle. On peut également souligner le nombre important d'interactions (flèches) entre ces entités. Ce modèle décrit l'évolution et les interactions à long terme (2100) sous effets de la croissance de cinq variables : la pollution, les ressources naturelles, la production agricole et industrielle et la population. Plusieurs scénarios sont envisagés en fonction de différentes politiques comme le contrôle de la pollution, ou celui de la population.

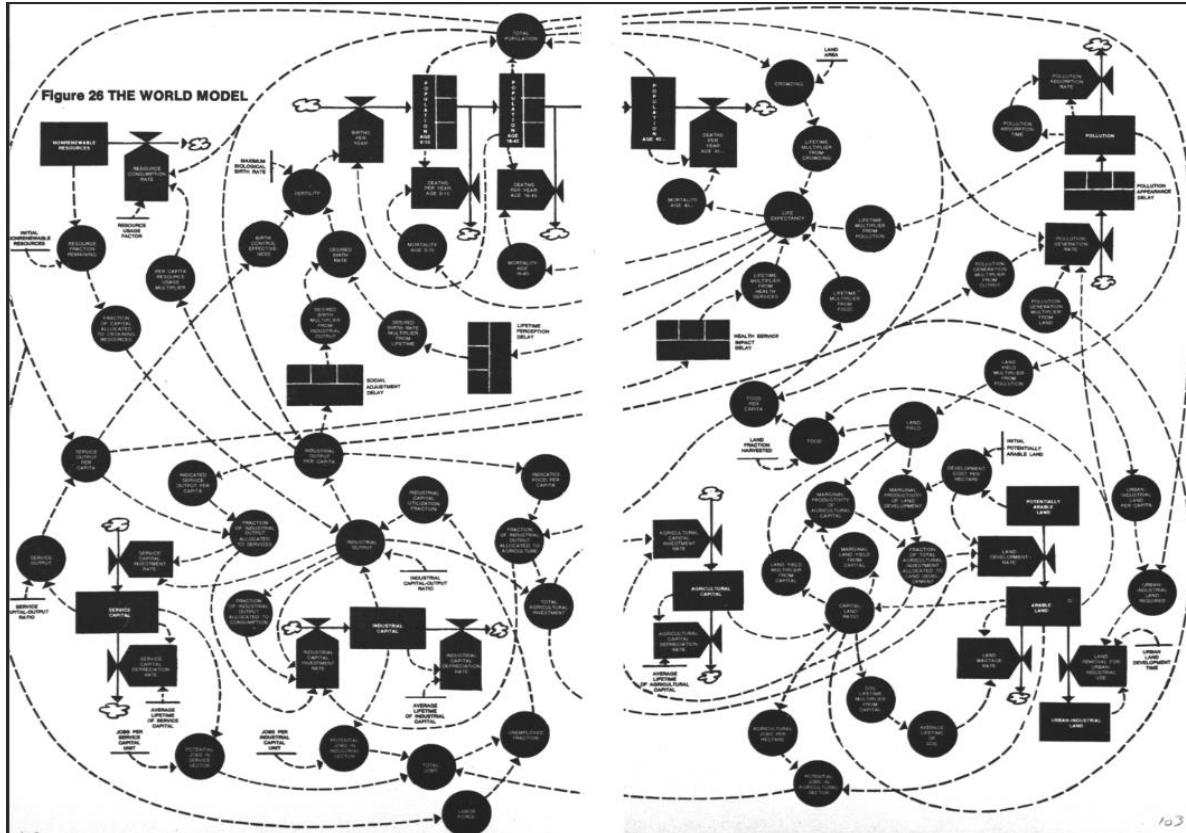


Figure 10. Ensemble de variables du modèle WORLD, développé par le club de Rome (Meadows et al., 1972).

Ce rapport a été soumis à de nombreuses critiques, parfois justifiées, comme des lacunes sur les mécanismes économiques ou des disparités trop grandes entre les pays pour les assimiler à un même modèle. Afin de répondre aux questions soulevées, de plus en plus de scientifiques s'emparent du sujet de la modélisation prospective. Les différents travaux sur le développement de modèles globaux aboutiront à la création du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) afin d'envisager la question climatique à long terme (Figure 11). Les scénarios envisagés sont représentés par différentes trajectoires de forçage radiatif. L'intensité du forçage radiatif repose sur des choix politiques de réduction, de stagnation ou d'augmentation des émissions carbone.

Ce type de modèle est appelé modèle intégré (IAM), car il tente de représenter des systèmes complexes et pluridisciplinaires entre sciences sociales et sciences environnementales. Ils sont développés majoritairement dans des champs disciplinaires liés à l'environnement afin de représenter les effets des actions anthropiques sur l'état des ressources ou l'état d'un système. Les processus représentés intègrent plusieurs processus de nature physique différente. Cette représentation par les modèles est souvent empirique et/ou conceptuelle. Les modèles intégrés peuvent également être spatialisés afin de représenter la dimension spatiale des processus. Les conclusions issues des résultats des simulations de ces modèles sont majoritairement destinées aux « décideurs politiques », afin que leurs choix soient éclairés par des prévisions plausibles et systémiques ([Elsawah et al., 2017](#)). Il existe des modèles intégrés agro-hydrologiques qui visent à évaluer l'évolution des systèmes agricoles sous différents angles (économique, climatique, agronomique...). Le développement de ces modèles ambitionne de représenter un ensemble de systèmes très différents afin de généraliser l'outil dans le contexte de l'aide à la décision ([Ruane et al., 2017](#)).

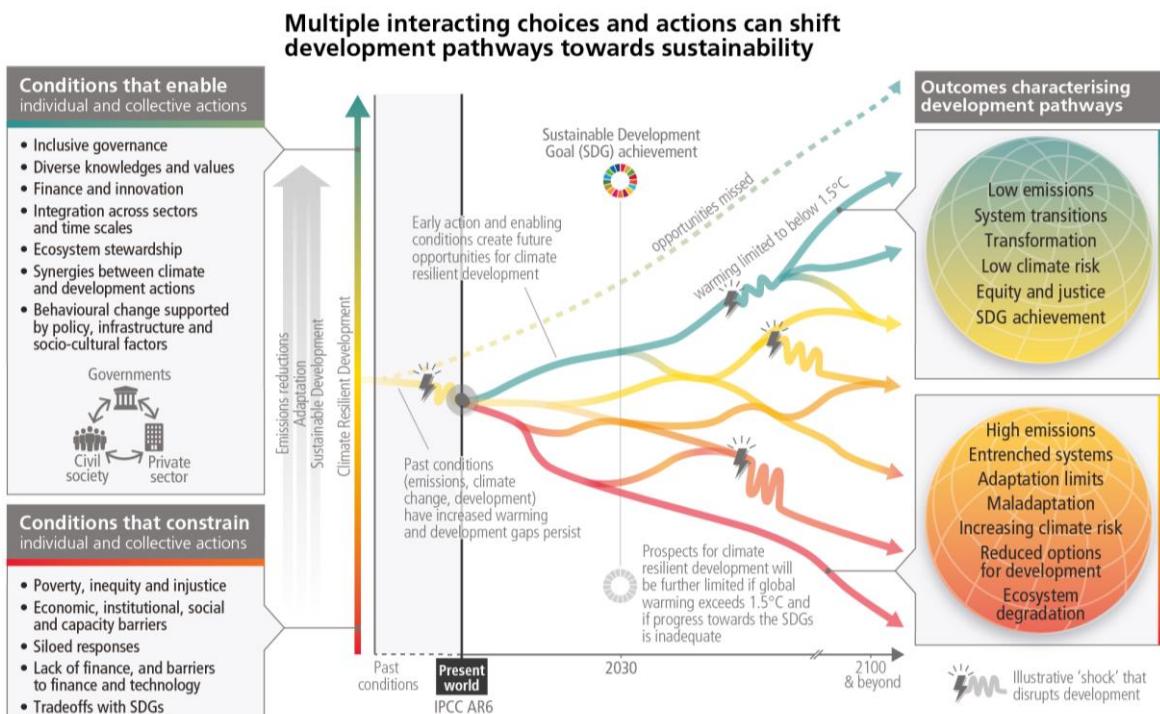


Figure 11. SPM.6 présentant les différentes trajectoires possibles en fonction de l'intensité du forçage radiatif issue du sixième rapport du GIEC, 2023.

### 3.2 Intégrer la modélisation à la prospective et aux exercices participatifs

#### *La puissance sociale de la quantification*

Au début du XIXe siècle, la quantification est un moyen de consolider l'ordre social par le biais d'outils de supervision (cartes et cadastres, homogénéisation des unités de mesure...). C'est à cette époque que les mathématiques se sont intéressées au développement d'outils pour traiter des données sociales, en commençant par la statistique des populations, avant de l'étendre à d'autres domaines ([Jensen, 2018](#)). La quantification devient un élément justificatif à la mise en place des politiques qui accompagnent la rationalisation du développement économique lors de la révolution industrielle. C'est par exemple le cas du courant hygiéniste qui a imposé de manière centralisée des normes d'hygiène, de sécurité et de conditions de travail en s'appuyant sur des données statistiques ([Jarrige & Roux, 2019](#)). Depuis, la quantification de phénomènes est un fait nécessaire afin d'administrer une preuve scientifique ([Espeland & Stevens, 2008](#) ; [Mau, 2019](#)). Dans les processus de prise de décision, l'apport d'informations quantifiées est une norme dans de nombreux domaines, avec des répercussions profondes sur l'organisation de la société et les modes de gouvernances ([Islam, 2021](#)). Les données chiffrées sont systématiquement utilisées pour élaborer les politiques mais elles sont également utilisées pour convaincre, notamment dans les exercices participatifs destinés à une grande diversité de parties prenantes ([Delmotte et al., 2017](#) ; [Bhave et al., 2014](#)). Néanmoins, toutes les mobilisations de chiffres ne permettent pas de faire émerger des politiques publiques efficaces, comme c'est le cas concernant les politiques climatiques ou celles liées à la biodiversité ([Compagnon & Rodary, 2017](#)). La quantification est également un processus de transformation du réel qui crée de nouvelles représentations ([Desrosières, 2008](#)). C'est cela qui est mis en jeu en modélisation prospective, essayer de quantifier des mondes qui n'existent pas encore pour légitimer leur existence et montrer la plausibilité de ces futurs alternatifs.

#### *Intégration de la modélisation aux exercices prospectifs participatifs*

Les exercices participatifs utilisant les modèles comme supports se sont généralisés pour prendre des décisions concertées appuyées par les modèles ([Kotamäki et al., 2024](#)), intégrer les savoirs profanes aux modèles ou dans un but de démocratisation des savoirs liés à la compréhension globale d'un système ([Voinov & Bousquet, 2010](#)).

Il existe plusieurs manières d'intégrer les participants dans un processus qui inclut de la modélisation. La forme la plus aboutie d'intégration est la modélisation participative, c'est-à-dire que les participants sont impliqués dans la construction même d'un modèle. Cette méthode a pour fonction de s'intéresser collectivement au système étudié et d'essayer de mieux l'appréhender (effets politiques, économiques et sociaux sur un système environnemental, interactions existantes dans ce système dont boucles de rétroactions, dynamisme propre au système...) dans l'optique d'une prise de décision éclairée. Les modèles conçus peuvent être assez basiques, comme les diagrammes de causalité ([van Vliet et al., 2010](#)) ou plus complexes, comme dans la modélisation d'accompagnement ([Etienne et al., 2011](#)). Concernant la modélisation d'accompagnement, les modèles sont des systèmes multi-agents qui sont associés avec l'utilisation de jeux de rôle afin de simuler le comportement des acteurs et ses conséquences sur l'évolution du système.

Les modèles sont également utilisés dans certains travaux de recherche-action participatifs. La participation des acteurs à la création du modèle n'est pas toujours l'enjeux de ce type de travail qui s'intéresse davantage aux processus d'engagement des parties prenantes dans un cadre spécifique et utilise les modèles comme un outil de discussion et de concertation ([Voinov & Bousquet, 2010](#)), comme c'est le cas dans ce travail de thèse.

Dans un certain nombre de projet, la modélisation participative a pour objectif final d'être un processus transformatif pour les parties prenantes impliquées ([van Bruggen et al., 2019](#)). L'utilisation de modèles est une façon d'approcher une certaine complexité des systèmes sous une forme simplifiée. Dans cette optique, l'usage de modèles est une base de réflexion critique sur l'ensemble des modes de vie, voire des politiques qui les régissent. Une pratique transformative par le biais de la modélisation participative requiert (i) des modèles robustes considérés comme « objets frontières » qui rassemblent un grand nombre de parties prenantes autour d'une problématique commune et (ii) des pratiques d'accompagnement des parties prenantes qui favorisent la transmission de connaissances issues des modèles pour qu'elles les intègrent à leur paradigme ([van Bruggen et al., 2019](#)).

**La Figure 12 permet de situer notre approche parmi les diverses composantes de la modélisation participative qui engagent les participants à des objectifs différents ([Voinov et al., 2016](#)).** Les participants sont engagés dans un processus de recherche action où ils contribuent partiellement à l'élaboration des données d'entrées nécessaires au modèle, les résultats sont finalement évalués et sont utilisés comme support à la réflexion visant une prise de décision à court terme. Les deux autres composantes concernent la modélisation participative, soit le processus de conception du modèle avec les participants aux ateliers. Cette méthode n'a pas été retenue, car le choix s'est orienté vers des modèles intégrés capables de représenter une diversité de disciplines. Ces modèles se révèlent trop complexes pour être utilisés dans le cadre d'une modélisation participative, particulièrement avec la contrainte de frugalité. Par conséquent, le processus ne peut être

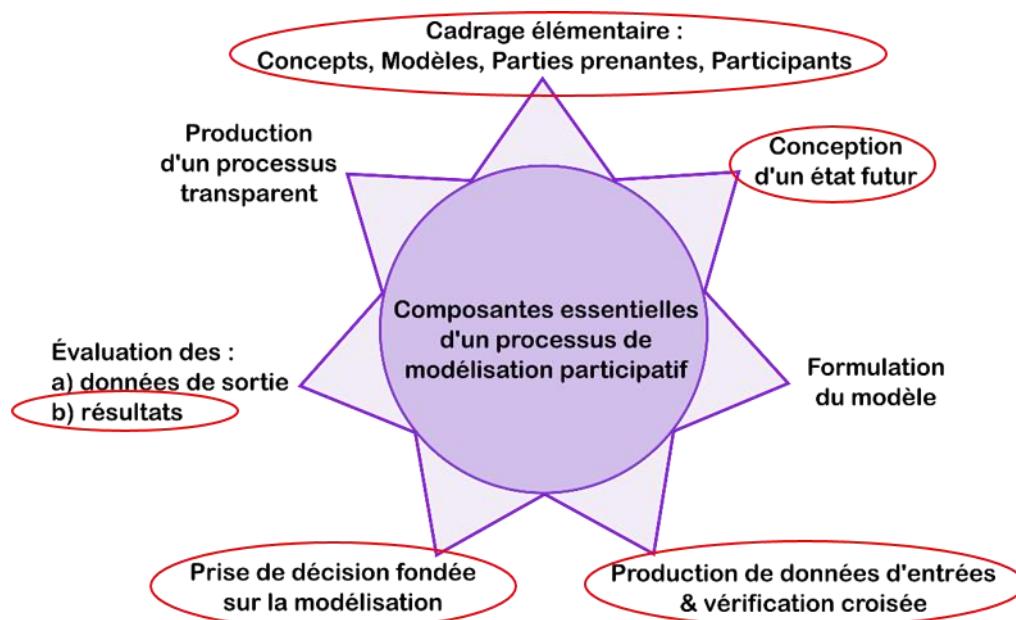


Figure 12. Différentes composantes de la modélisation proposées. Les composantes entourées en rouge sont celles qui sont utilisées dans le cadre du projet (d'après [Voinov et al., 2016](#)).

entièrement transparent, les formats d'ateliers étant trop courts pour garantir une transparence totale.

#### *La modélisation comme support d'aide à la décision dans des systèmes complexes*

La modélisation est basée sur le constat qu'il est possible de représenter des phénomènes et des événements particuliers par des équations ([Wigner, 1960](#)). Ainsi, les modèles se sont développés avec le temps pour tenter d'approcher de plus en plus ces phénomènes par des combinaisons spécifiques d'équations, ce qui a conduit à une grande diversité de modèles disponibles qui ont chacun des spécificités propres.

La modélisation prédictive produit des données caractérisant les tendances futures. Elle est produite pour de nombreuses raisons en environnement : la prévention de risques environnementaux ([Roche et al., 2012](#)), la gestion des ressources naturelles ([Etienne et al., 2011](#)), les effets du changement climatique et ses différentes évolutions ([IPCC, 2023](#)). La modélisation intégrée des systèmes sociaux et environnementaux favorise la représentation des systèmes via des processus complexes en interaction ([Elsawah et al., 2020](#)), y compris par le biais de représentations assez simples comme des échanges de flux ([Bodner et al., 2020](#)). C'est un outil particulièrement utilisé dans l'aide à la décision à différentes échelles (globales, régionales, locales). L'aide à la décision est un critère de développement pour un certain nombre de modèle, comme MAELIA et SWAT qui sont utilisés dans le cadre de cette thèse.

#### *Les limites de l'utilisation des modèles en prospective*

L'usage de modèle dans les prospectives environnementales se heurtent à de multiples problèmes :

- La complexité de représenter des systèmes globaux, dynamiques et interconnectés dont la représentation du réel par un modèle est toujours approximative ([Elsawah et al., 2017](#)). La multiplication du nombre de paramètres pour tendre vers une représentation plus fidèle a aussi pour conséquence de rendre les modèles opaques, moins compréhensibles et sujet à la propagation d'incertitude.
- Le fait de devoir représenter des phénomènes, qui reposent sur des hypothèses encore mal connues, liés au climat par exemple ([Beck, 2002](#)). Ces incertitudes élevées remettent en cause les savoirs liés au développement même de modèles ([Beck, 2002](#)) qui s'appuie sur des hypothèses scientifiques connues et la validation empirique de celles-ci ([Funtowicz et Ravetz, 1990](#)).
- La question des incertitudes qui est inhérente aux questions de modélisation en générale : (i) la capacité relative des modèles à reproduire fidèlement un système ; (ii) les incertitudes stochastiques notamment sur les paramètres physiques et conditions aux limites ([Riley, 2015](#) ; [Walker et al., 2003](#)) et (iii) les incertitudes liées à la résolution numérique du modèle.
- Les incertitudes liées aux prospectives participatives et donc à des méthodologies toujours en évolution (i.e construction de modèles, de scénarios, intégration des politiques dans les modèles...) ([van Bruggen et al., 2019](#)). On peut notamment citer ces incertitudes qui sont de différents ordres :

- (i) Des incertitudes de **contexte** ou **effets de cadre** qui sont les limites du système et de ses représentations. Dans notre cas, cela concerne le futur du système agro-hydrologique qui intègre de nouvelles pratiques, assolements ou technologies par exemple.
- (ii) Des incertitudes concernant les **données d'entrées** des modèles qui sont des données descriptives du système. Pour des données futures, il n'existe pas de références quantifiées sur des variables agro-hydrologiques issus de systèmes qui n'existent pas encore.
- (iii) Des incertitudes de **calage** qui utilisent des variables agro-hydrologiques présumées à partir des quantifications et forçages disponibles pour calibrer et valider le modèle. Si la quantification de variables agro-hydrologiques est incertaine, alors la calibration et la validation des modèles utilisés en prospective s'opère sur des variables incertaines ce qui augmente l'incertitude totale des résultats du modèle.

La robustesse des modèles se fait ainsi sur le temps long. Les trajectoires anticipées, par exemple par les modèles climatiques, ne sont fiabilisées qu'une fois qu'une tendance simulée à long terme est soumise à validation par les données observées.

Ces incertitudes pointent les limites de l'utilisation de modèles en prospective, d'autant plus lors d'un exercice de prospective participatif. En effet, si les résultats du modèle ne sont pas assez robustes, il est possible que les participants les contestent ([Voinov & Bousquet, 2010](#)) et ces incertitudes doivent donc être explicitées afin de rendre le processus le plus transparent possible et de minimiser la remise en cause des résultats par les participants.

**Un des obstacles rencontrés dans ce travail de thèse réside dans les incertitudes liées à l'utilisation de modèles pour un exercice de prospective. Il s'agit notamment d'introduire de nouvelles pratiques, de nouveaux usages dans des systèmes basés sur de l'existant. Ce travail est développé dans le [chapitre 4](#) et le [chapitre 5](#). Le second point travaillé sur la question des incertitudes est le réalisme des résultats au regard des hypothèses de modélisation formulées, comme par exemple la difficile représentations des stress thermiques, hydriques et azotés qui sont détaillés dans le [chapitre 5](#).**

### 3.3 Les besoins pour la modélisation agro-hydrologique

#### *Les cycles du carbone et de l'azote*

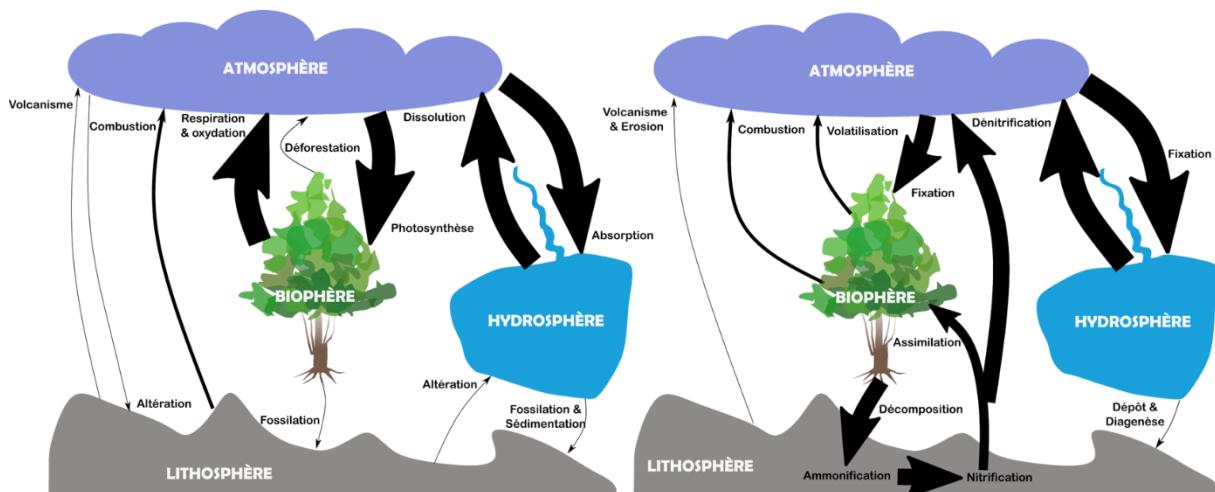
Une partie des cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone (Figure 13) doivent être représentés, en particulier la biosphère et ses interactions avec la lithosphère dont les processus ont une importance significative sur la dynamique de croissance des cultures. Il est pour cela nécessaire de connaître les répartitions de carbone et d'azote, ainsi que leurs formes (disponibilité, organique ou minérale), dans les différents horizons du sol. Le cycle de l'azote joue un rôle essentiel dans la croissance des plantes, car l'azote est un élément limitant pour leur développement. La biodisponibilité de l'azote dépend de sa forme, seul  $\text{NH}_4^+$  est biodisponible. On le retrouve sous cette forme après fixation symbiotique de l'azote

atmosphérique ou après décomposition des résidus de végétaux par les bactéries dans le sol par des processus d'ammonification et de nitrification. Le cycle du carbone est également très important dans les dynamiques de croissance des végétaux, la composition du sol, mais aussi l'évolution des processus liés au climat. Les processus directeurs dans l'évolution des flux de carbone sont la respiration, l'oxydation et la photosynthèse ([Batlle-Aguilar et al., 2010](#)). Les deux cycles biogéochimiques ont des fonctionnements interconnectés qui sont particulièrement observés, de manière empirique, en agronomie. En particulier, le rapport carbone sur azote indique la capacité de dégradation microbienne d'un résidu organique et détermine les évolutions de stocks en nutriments ([Brady & Weil, 2004](#)). De même, le processus de nitrification requiert de l'énergie fournie par les molécules de carbone biodisponibles pour les bactéries dans le sol ([Batlle-Aguilar et al., 2010](#)).

Une modélisation agronomique performante doit ainsi pouvoir simuler des représentations dynamiques des concentrations en carbone et azote, particulièrement dans le compartiment du sol. La combinaison de ces deux cycles est également primordiale afin d'observer les effets des changements d'occupation des sols à long terme, sous pression climatique. Une variation notable dans l'évaluation des réserves de carbone du compartiment lithosphérique est observée en réponse aux fluctuations annuelles de température et de précipitations, qui sont surestimées lorsque le cycle du carbone n'est pas couplé à celui de l'azote ([Thornton et al., 2007](#)).

En plus des paramètres agronomiques classiques, les modèles sélectionnés doivent être capable de représenter les pratiques agricoles et leurs effets sur l'environnement. Parmi ces pratiques, on retrouve l'utilisation d'intrants qui est largement utilisée dans les pratiques conventionnelles. Il est crucial de prendre en compte les engrains, la part d'azote assimilable par les plantes, la part lixiviee et la quantité optimale d'azote à introduire par les engrains ([von Bloh et al., 2017](#)).

Le cycle des pesticides doit également être intégré à la modélisation, et en particulier leur devenir dans l'environnement en fonction des différentes pratiques agricoles ([Queyrel et al., 2016](#)). Plus généralement, l'ensemble des pratiques agricoles (e.g périodes de semis, travail du sol, fertilisation, épandage de pesticides, périodes de récoltes, matériel utilisés...) doivent



*Figure 13. Représentation des différents compartiments environnementaux et des flux en fonction de leur importance dans le cycle du carbone (à gauche) et dans le cycle de l'azote (à droite).*

être prises en compte pour déterminer si le changement de pratique a des effets directs sur l'environnement ([Therond et al., 2014](#)).

### *Le cycle de l'eau*

D'un point de vue agronomique, l'eau est une ressource nécessaire à la croissance des végétaux. La modélisation du cycle de l'eau (Figure 14), particulièrement dans le comportement du sol est essentielle pour représenter la croissance des cultures. En effet, l'eau est un élément indispensable pour la plante qui joue un rôle crucial dans la régulation de la température des feuilles, la rigidité de la tige, ainsi que dans des réactions chimiques essentielles, telles que la photosynthèse ([Jones, 1985](#)). La présence de l'eau dans le sol dépend de sa texture et des différents agencements des éléments présents dans le sol. Le sol est dit saturé lorsque tous les pores sont remplis et non saturé lorsque qu'il existe de l'air dans les interstices. Plusieurs processus en particulier doivent être représentés afin de simuler le bilan hydrique du sol : infiltration, ruissellement, drainage, absorption de l'eau par les racines et évapotranspiration, ce qui permet par exemple de simuler le stress hydrique dans les cycles végétatifs ([Brisson et al., 2006](#)).

En plus des besoins agronomiques, cette thèse vise à quantifier les flux d'eau dans la rivière afin d'avoir une représentation de l'évolution des débits sous contrainte climatique. Il est donc nécessaire que la modélisation utilisée soit capable de simuler également ces flux.

L'intégration des variables climatiques (précipitation, température...) est une condition de forçage indispensable à la modélisation hydrologique dont les dynamiques sont régies par les conditions climatiques, de même que l'évolution des processus agronomiques. Les modèles utilisés doivent donc disposer de modules climatiques intégrés qui disposent d'un module de forçage climatique.

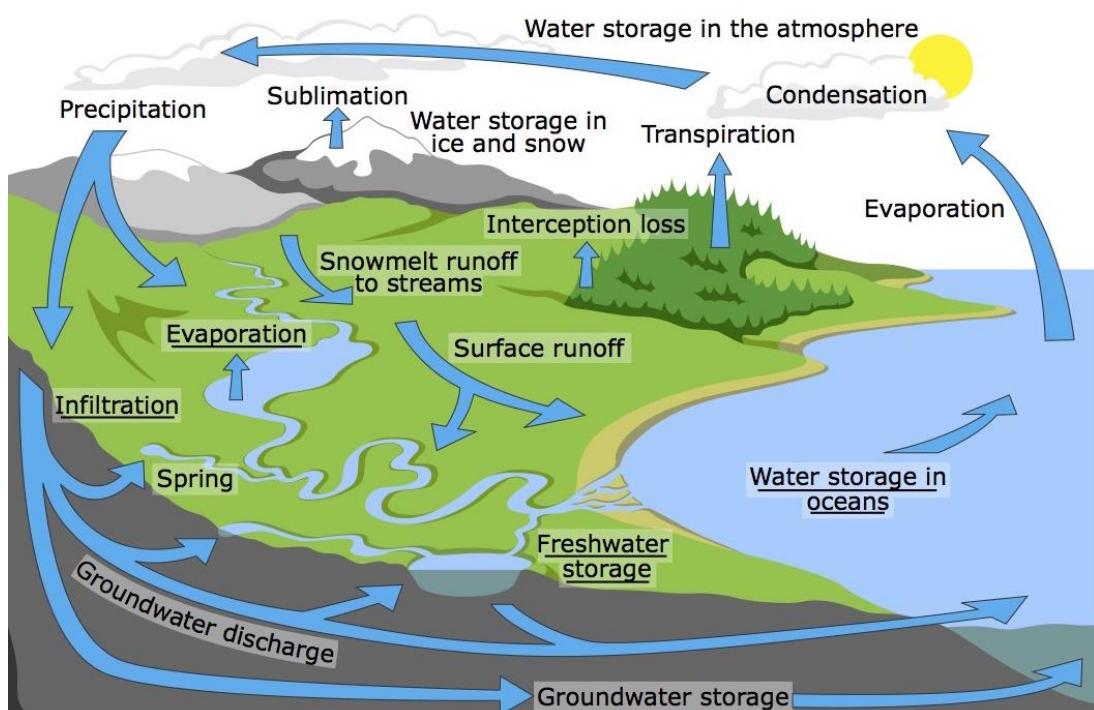


Figure 14. Représentation des différents compartiments environnementaux et des flux dans le cycle de l'eau naturel, Université de Walkato.

### *Les besoins spatialisés requis*

A l'échelle d'un bassin versant ou d'un territoire d'une centaine de km<sup>2</sup>, on observe de grandes disparités en termes de propriétés de sol, d'occupation du sol, de pente et même parfois de climat. Les modèles **spatialisés**, c'est-à-dire dont les résultats sont disponibles à plusieurs localisations d'un site étudié, prennent en compte cette hétérogénéité spatiale, par exemple en simulant les échanges eau-racine sur les dimensions verticales et horizontales (prise en compte de l'hétérogénéité des sols, des pentes...) (*Kanda et al., 2018*). L'utilisation de modèles hydrologiques distribués est un moyen de prendre en compte les différents régimes hydriques à l'échelle d'une maille. De plus, cela facilite les échanges avec les participants sur des points précis représentant le territoire en discussion.

### **3.4 Sélection des modèles agro-hydrologiques MAELIA et SWAT**

Le choix des modèles s'est porté sur les modèles MAELIA et sur le modèle SWAT+ (Tableau 4), qui sont deux modèles avec une approche couplée **conceptuelle**, s'appuyant sur des concepts simples et souvent analogiques, de type réservoir et **empirique**, s'appuyant sur des résultats issus d'observations scientifiques, concernant la partie hydrologique du modèle (évapotranspiration, teneur en eau dans le sol...). Il s'agit de modèles **semi-distribués**, séparant le bassin versant en plusieurs entités spatiales, suivant une simulation journalière. La combinaison de ces modèles rend possible la production de l'ensemble des résultats de modélisation souhaités.

#### *Présentation générale des modèles*

MAELIA est un modèle intégré qui étudie les interactions agriculture et gestion de l'eau (*Gaudou et al., 2014*). Il a été développé par une équipe de recherche de l'INRAE et conçu à des fins de support de discussion dans les exercices participatifs, notamment sur les questions quantitatives. Il est utilisé dans quelques études prospectives participatives, particulièrement sur des questions d'irrigation sur le bassin Adour-Garonne (*Allain et al., 2020*). C'est un des rares modèles à prendre en compte, de manière si détaillée, les pratiques agricoles dans une optique d'intégrer le monde agricole aux discussions de changement de pratique. Cela offre ainsi la possibilité de tester des scénarios qui intègrent des changements de pratiques agricoles (fertilisation, irrigation...). Le modèle a une approche multi-agents, c'est-à-dire que chaque agriculteur représenté sur un territoire a ses propres stratégies et donc qu'il est

Tableau 4. Présentation des différentes particularités et représentations agro-hydrologiques disponibles dans les modèles SWAT et MAELIA (✓ : représentation des processus ; X : pas de représentation des processus ; ~ : représentation partielle des processus).

	MAELIA	SWAT+
Cycle de l'eau	Surface- souterrain	Surface- souterrain
Cycle de l'azote	✓	✓
Cycle du carbone	~	~
Cycle des pesticides	X	✓
Pratiques agricoles	✓	✓
Maillage	Parcelle	HRU (plus petite unité hydrologique)

possible de tester différentes stratégies possibles dans une même simulation. L'utilisation de MAELIA dans ce travail se limite à son module agricole (cf. infra) qui modélise les pratiques agricoles et leurs effets sur la croissance des cultures et leur rendement.

SWAT+ est un modèle intégré qui étudie les interactions entre les processus hydrologique et l'occupation des sols dans des bassins versants comme le transport de sédiment, de nutriments et de polluant (*Bieger et al., 2017*). L'unité de base utilisée dans ce modèle est le HRU, qui sert à diviser le bassin versant en de plus petites unités hydrologiques indépendantes. SWAT+ a été créé en 1994 (*Srinivasan & Arnold, 1994*), financé par le gouvernement américain afin d'estimer les effets de la modification de l'occupation du sol sur les processus hydrologiques. Depuis 1994, le model évolue, notamment en améliorant les effets des variations climatiques sur le système agricole ou sur l'intégration des pratiques agricoles. SWAT+ a été utilisé dans différentes études sur les effets du changement climatique sur la ressource en eau et sur les effets potentiels de modification de l'occupation du sol sur les différents processus hydrologiques d'un bassin versant. SWAT dispose d'une interface et d'une boîte à outil facilitant la prise en main du modèle.

#### Flux d'eau dans le sol (similaire pour MAELIA & SWAT+) (*Constantin et al., 2015*)

Le sol est discrétisé en quatre réservoirs différents en cascade les uns vers les autres où l'ensemble des processus présents sur la Figure 15 apparaissent.

Il s'agit d'un module conceptuel dont les flux d'eau sont fonction :

- Des caractéristiques du sol, indiquées en données d'entrées : profondeur, teneurs en argile, textures, pente, perméabilité, réserves utiles délimitées par la capacité au champ (i.e. teneur maximale en eau avant ressuyage) et le point de flétrissement (i.e. seuil à partir duquel les plantes ne sont plus en capacité de fournir une pression adéquate pour prélever de l'eau).
- Des précipitations journalières et de l'irrigation également indiquées en données d'entrées

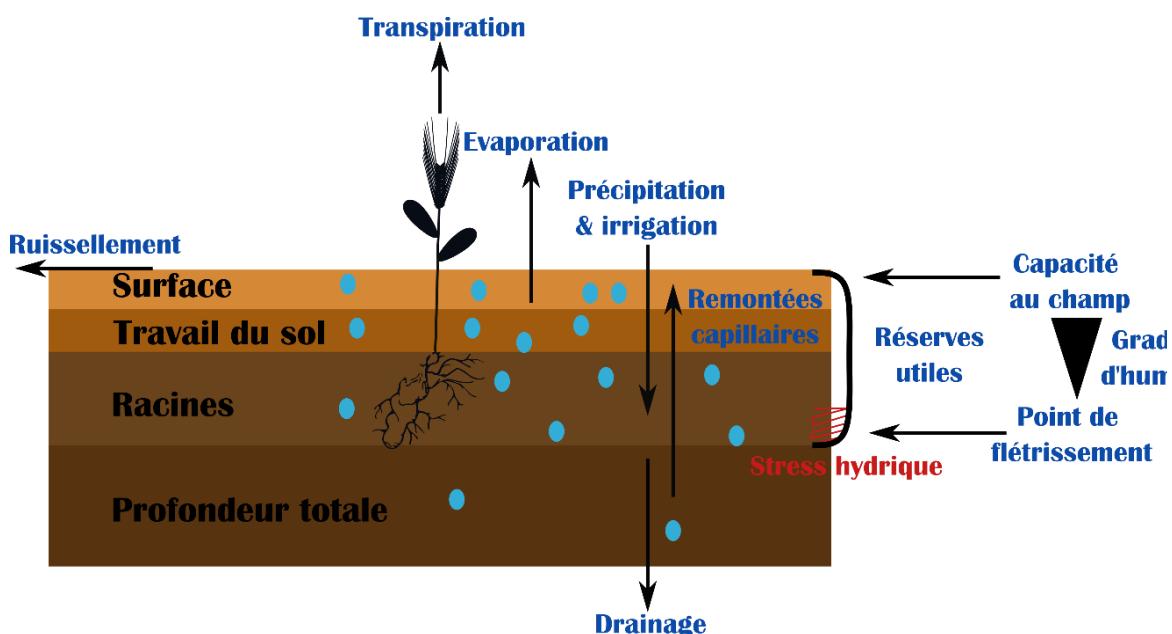


Figure 15. Processus régissant les flux d'eau dans le sol représentés dans le module agricole du modèle MAELIA.

- De l'évaporation journalière calculée à partir de la formule de l'évapo-transpiration de Penmann-Monteith ([Allen et al., 1998](#)), corrigé par coefficients de couverture de sol
- De la transpiration journalière des cultures calculée à partir de la formule de l'évapo-transpiration de Penmann-Monteith, en retirant l'évaporation, corrigée par des coefficients cultureaux
- Du drainage, estimé à partir du surplus restant après les calculs des autres flux (précipitation, évaporation et transpiration)

Chaque horizon contient une réserve utile qui varie en fonction du travail du sol, du taux d'argile, ainsi que de l'apport en eau (précipitation et irrigation). Les réserves utiles de surface et de travail sont également alimentées par des remontées capillaires qui alimentent de manière constante la réserve utile de la couche de travail.

Flux d'azote et de carbone dans le sol (adaptation du modèle STIC pour MAELIA) ([Clivot et al., 2022](#))

Le sol est discrétisé en trois réservoirs différents en cascade où l'ensemble des processus présents sur la Figure 16 apparaissent.

Il s'agit d'un module conceptuel dont les flux d'azote sont calculés en fonction de :

- L'efficacité de la fertilisation qui dépend de la quantité d'eau présente dans les horizons, et donc de la quantité de précipitation et d'irrigation apportée au sol. MAELIA calcule bien une différence entre l'apport de nutriments issus de la fertilisation et la part de cet apport qui correspond à une fertilisation efficace, dépendant principalement de l'humidité du sol. La part volatilisée lors de l'application d'engrais est comptabilisée parmi les gaz à effet de serre ( $N_2O$ ,  $NO_3$  et  $NH_3$ ) émis lors de l'opération technique de fertilisation. La part d'azote apportée au sol par fertilisation est minérale.
- La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique pour les fabacées qui est prise en compte par le modèle

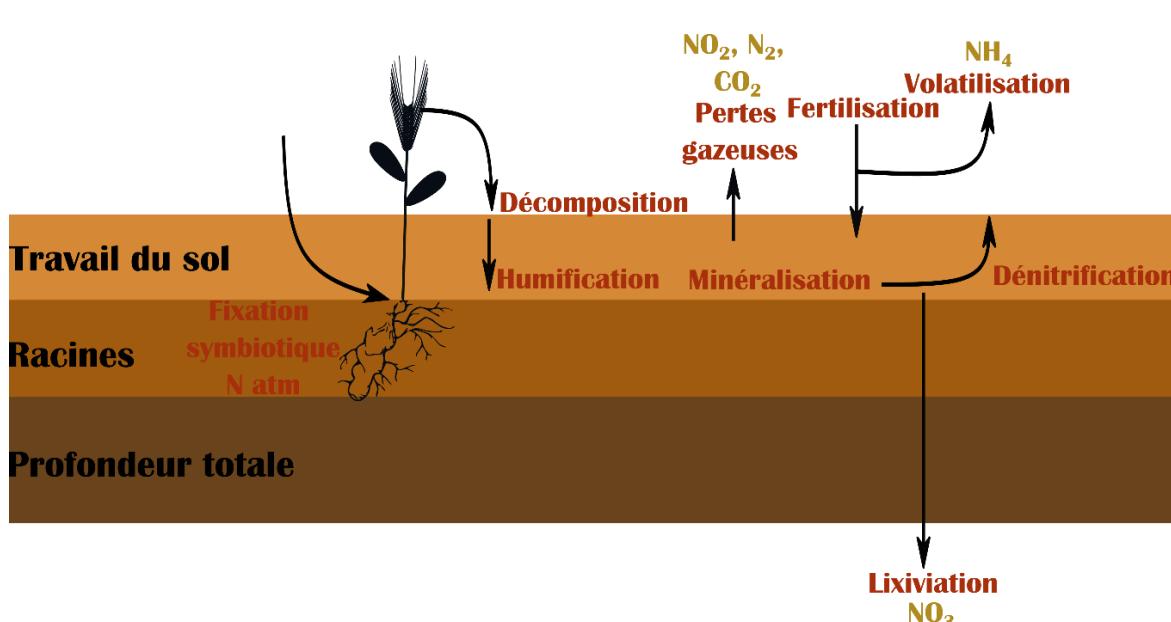


Figure 16. Processus régissant les flux d'azote et de carbone dans le sol représentés dans le module agricole du modèle MAELIA.

- Tous les mécanismes de transformation de la matière organique issus du cycle du carbone et de l'azote (fertilisation minérale et organique et résidus de cultures) que sont la décomposition, l'humification sont réalisés dans le premier horizon de sol. Ces mécanismes concernent : le système racinaire, le système aérien et prend en compte les précédents stocks déjà emmagasinés dans le sol. La décomposition et l'humification dépendent du type de résidu et du rapport C/N, ainsi que des conditions climatiques (température, teneur en eau dans l'horizon de travail). Elles dépendent également du stock d'azote minéral disponible dans l'horizon de travail.
- Le taux de minéralisation qui dépend des conditions pédoclimatiques, soit des stocks de matière organique, du rapport C/N, du pH et de la teneur en argile et carbonates (qui sont des données d'entrées). Ce taux dépend également des conditions climatiques.
- Les prélèvements d'azote par les plantes qui dépendent de leur répartition à travers les horizons. Si la quantité d'azote est insuffisante dans les deux premiers horizons, l'azote disponible dans l'ensemble des horizons peut être prélevé par les plantes.
- La dénitrification qui dépend du taux de nitrate et des conditions climatiques et topologiques (température, teneur en eau dans l'horizon travail et pH).
- La lixiviation qui entraîne les flux d'azote via les flux d'eau d'un horizon de sol à un autre. Les transferts de flux dépendent donc des flux d'eau et de l'humidité présente dans les réservoirs, mais aussi de la densité apparente des horizons.

L'ensemble de ces processus est également représenté dans SWAT+, bien que le modèle diffère légèrement : dans SWAT+, il existe cinq compartiment de stockage de l'azote et de la matière organique en fonction de leurs origines (biomasse, fertilisation...).

### Croissance des cultures (*Constantin et al., 2015*)

La croissance des cultures dans MAELIA est schématisée sur la Figure 17. La modélisation du développement des cultures dépend de la température. Elle est basée sur l'observation empirique de jours de croissance, soit d'accumulation de la température quotidienne qui permet d'atteindre les différents stades de maturité en fonction de la culture. Le coefficient cultural dépend de chaque culture (croissance potentielle, indice d'expansion foliaire...) mais également de paramètres climatiques (température et transpiration des cultures). Ces données sont également des données d'entrées.

Le rendement des cultures est l'écart entre un rendement optimal (mentionné dans les données d'entrées) et la satisfaction hydrique et azotée de la culture. Il dépend également de

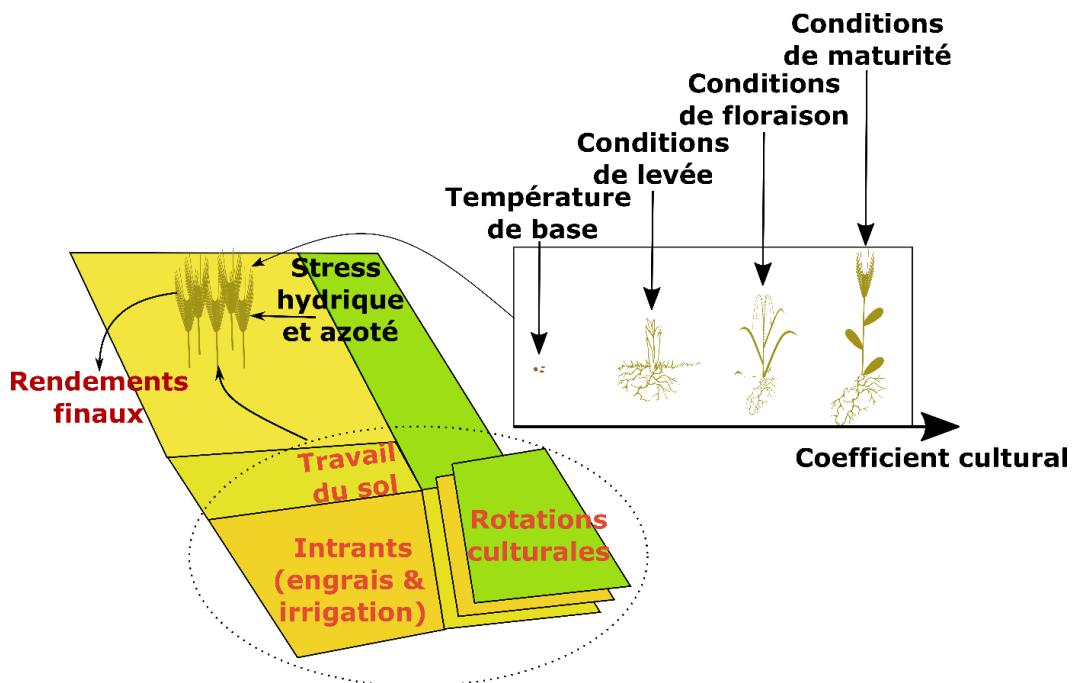


Figure 17. Paramètres régissant la croissance des cultures et leur rendement dans le module agricole du modèle MAELIA (en orange les données d'entrées, en noir les paramètres internes au modèle et en rouge les données de sortie).

différents facteurs agronomiques comme le type et la quantité d'engrais apportés au sol, la présence et la quantité d'irrigation, les types de rotations culturelles apportés et la quantité de nutriments laissée au sol en fonction des cultures modélisées et le travail du sol.

#### Choix des assolements et différentes opérations techniques disponibles

Différentes opérations techniques sont représentées dans MAELIA : travail du sol, semis, fertilisation, irrigation, récolte... Ces opérations sont définies par parcelle en fonction des cultures et l'itinéraire technique suivi est imposé dans les données d'entrées. Cet itinéraire définit des fenêtres temporelles pour chacune des opérations techniques qui sont réalisées selon des règles de priorisation et de décision. En effet, la réalisation des opérations dépend particulièrement des conditions climatiques qui sont favorables ou non à leur réalisation. C'est également le cas dans SWAT+, bien qu'il existe des fenêtres déjà définies par culture.

#### Cycle des pesticides (SWAT+)

Le cycle de pesticides modélise le comportement, le transport et le devenir des pesticides à l'aide de l'algorithme GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) sur le feuillage et dans les couches de sol ([Leonard et al., 1995](#)). Deux voies d'application des pesticides (incorporation dans le sol ou par voie aérienne) sont possibles dans SWAT+. Les pesticides se dégradent selon trois processus principaux : la photodégradation (exposition à la lumière), la dégradation chimique (due aux produits chimiques déjà présents dans les sols) et la biodégradation (utilisation du substrat par les organismes). Ces processus de dégradation sont suivis par la demi-vie (DT50), c'est-à-dire le nombre de jour nécessaire pour que la concentration d'un pesticide soit réduite de moitié. SWAT+ fait la distinction entre les demi-vies dans le sol et les demi-vies foliaires. En outre, le

lessivage et le ruissellement, qui ne se produisent que si les précipitations dépassent 2,54 mm en un jour, régissent le transport des molécules de pesticides.

### 3.5 Application du principe de frugalité

L'approche de frugalité est adoptée dès le début du projet, en privilégiant l'utilisation des modèles existants plutôt que de développer de nouveaux outils de modélisation. La difficulté d'utiliser l'existant est que chaque modèle est pensé en fonction d'un usage spécifique et que chaque usage diffère. Pour pallier à ce problème la solution avancée dans ce travail est de combiner différents modèles existants afin d'obtenir plusieurs variables de sorties caractéristiques de la question agro-environnementale ([Ahn et al., 2016](#)).

Une grande limite au parti pris de frugalité lors de son application à la modélisation est que les différentes étapes de modélisation sont longues : la collecte de données d'entrées, le formatage de ces dernières, les différents tests de calibration et de validation et le traitement des données de sortie. Le temps consacré à la modélisation varie en fonction des spécificités territoriales et s'avère indispensable pour l'étude de chaque nouveau territoire. Cependant, il dépend également du degré de précision attendu, à la fois (i) par les modèles et (ii) pour une représentation plus ou moins détaillée des particularités du territoire.

Un autre temps significatif est également consacré à la prise en main et à la compréhension du fonctionnement du modèle. Cela s'explique par les spécificités propres à chaque modèle, qu'il s'agisse du formatage des données d'entrée, des noms des paramètres, des choix d'équations pour représenter ces paramètres, ou encore du langage informatique utilisé. De plus, l'existence ou l'absence de plateforme et/ou de documentation facilitant l'utilisation des modèles peut également influencer cette phase.

Ainsi, la partie modélisation demande dans tous les cas un temps important qui vient pointer les limites du parti de pris de frugalité.

## 4. Présentation de la méthode générique

La méthode d'accompagnement des acteurs locaux dans une modification des pratiques comporte différentes étapes (Figure 18), qui sont détaillées dans cette partie.

Cette méthode consiste à réunir des acteurs locaux autour de la problématique agricole et de gestion de l'eau pour i) établir un constat partagé de l'état actuel de l'agro-hydrosystème et du climat à l'horizon 2070 ainsi que de la non soutenabilité de la poursuite des pratiques à partir d'une présentation de données sur l'évolution de certains paramètres sous contrainte climatique ; ii) construire des images du territoire à cet horizon, c'est-à-dire des représentations simplifiées de l'agro-hydrosystème sous contrainte de soutenabilité dans ces nouvelles conditions ; iii) compléter ces images par dire d'experts ou par la bibliographie pour obtenir des scénarios modélisables ; iv) simuler l'atteinte ou non des différentes composantes de la soutenabilité de ces agro-hydrosystèmes via des modèles agro-hydrologiques et mettre en débat les résultats présentés sous forme d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs.

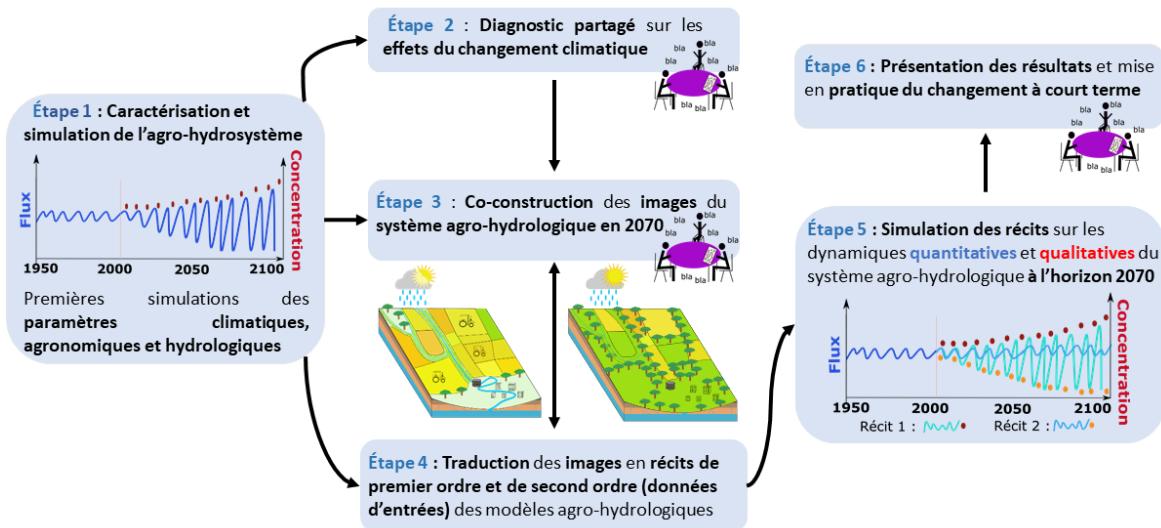


Figure 18. Présentation des principales étapes de la méthodologie d'accompagnement des acteurs locaux vers un changement de pratique plus soutenable.

#### 4.1 Caractérisation de l'agro-hydrosystème

##### *Caractérisation de l'agro-hydrosystème aujourd'hui*

La première étape de la méthode consiste à caractériser l'agro-hydrosystème dans sa forme actuelle, sur la période 2015-2022. Cette caractérisation dépend de l'accès à différentes données et suppose que l'on s'adresse aux bonnes personnes et institutions. La caractérisation s'étend sur plusieurs domaines :

- **Environnementale** : sur les pollutions présentes, notamment dans l'hydrosystème, ainsi que sur l'existence de risques environnementaux (sismicité, coulée de boue, érosion, inondation...). Cela concerne également l'hydrologie, notamment avec la collecte des différentes données de débits de la rivière, sur la morphologie du territoire (présence de nappe, nappes d'accompagnement...) et sur l'existence ou non d'échanges nappes-rivière. Ces données sont disponibles via l'Agence de l'eau locale et les syndicats d'eau.
- **Climatique** : sur la caractérisation du climat passé et présent. Ces données (précipitation, températures minimales, maximales et moyennes, ETP...) sont disponibles via les stations météo de Météo France s'il en existe localement ou sur des mailles spécifiques via Safran qui modélise des paramètres météorologiques à l'échelle de la maille à partir de données observées.
- **Géographiques et géologiques** : sur la délimitation du territoire étudié et sur les caractéristiques topologiques que l'on y trouve (pentes, caractérisation des différents horizons du sol, occupation du sol sur l'espace occupé par l'urbain, l'agricole, les espaces naturels...). La pédologie est caractérisée par une carte qui peut être disponible sur Géoportail ou fournie par la chambre d'agriculture. Les autres informations géographiques sont produites par l'institut national de l'information géographique (IGN) et sont disponibles pour toutes les régions.

- **Pratiques agricoles** : sur les cultures et filières présentes mais aussi sur les itinéraires techniques concernant la concentration et la forme des minéraux apporté lors de la fertilisation, les périodes de semis, récoltes, etc. Les informations relatives aux cultures sont disponibles via le registre parcellaire graphique (RPG) à l'échelle de la parcelle (depuis 2015). Les informations concernant les pratiques peuvent être issues d'études sur le territoire, souvent faites par la chambre d'agriculture locale ou concernant la fertilisation et l'usage de pesticide par les institutions environnementales. A défaut, elles doivent être collectées auprès de conseillers agricoles de la chambre d'agriculture locale. Il existe également des catalogues destinés aux agriculteurs au niveau local produits par les chambres d'agriculture qui donnent par culture des informations sur les pratiques agricoles à suivre, néanmoins il ne s'agit pas toujours des pratiques réellement suivies par les agriculteurs sur le terrain.

- **Sociologique et politique** : sur les différentes parties prenantes présentes sur le territoire et les relations entre ces différents groupes. Chaque partie prenante identifiée est associée à une revendication quant à la question des pratiques agricoles et de la gestion de l'eau. Plus précisément, ces informations proviennent d'entretiens ciblés avec des acteurs issus de ces parties prenantes qui sont sélectionnés par leur connaissance du terrain et des problématiques agro-environnementales. Ces recherches ont également permis de former une liste de potentiels participants aux ateliers, soit parce qu'ils ont déjà participé à des exercices similaires, notamment de changement de pratique, soit parce qu'ils sont moteurs parmi un groupe de parties prenantes.

Les entretiens ont porté sur la population agricole, ses dynamiques actuelles (âge, mobilités, double activité, etc.) et son intégration dans l'histoire de ce territoire agricole. Cela inclut également des questions liées à la reprise des exploitations et à la difficulté de trouver de la main-d'œuvre. De la même manière, ces renseignements ont été produits sur les institutions, en particulier faisant partie de l'agro-hydrosystème (chambre d'agriculture régionale et locale ; syndicat de l'eau ; eurométropole de Strasbourg notamment en charge de la qualité de l'eau du réseau d'eau potable et de l'aménagement du territoire ; Agence de l'eau) mais aussi de certains groupements politiques (comme la communauté de commune du Kochersberg...). Les entretiens ont également permis de préciser la manière dont les mesures agro-environnementales ont été mises en place, les potentiels désaccords entre les parties prenantes et les résultats de ces mesures sur le territoire.

Cette caractérisation a pour objectif de (i) connaître le terrain et comprendre les dynamiques actuelles et (ii) collecter les données afin de modéliser ce territoire vis-à-vis des pratiques actuelles pour calibrer et valider les modèles.

Les données d'entrées des modèles utilisés sont visibles sur la Figure 19. La caractérisation de l'agro-hydrosystème du site étudié est détaillé dans le [chapitre 2](#).

### *Caractérisation des images à l'horizon 2070*

Après avoir validé les résultats sur la période actuelle, l'objectif est de simuler le fonctionnement de l'agro-hydrosystème Souffel à l'horizon climatique 2070 sans modification par rapport à l'actuel, exceptés des modifications sur le forçage climatique. La production et le partage des résultats doivent permettre de constater le degré de non soutenabilité des pratiques actuelles. La soutenabilité est appréhendée à l'aide d'indicateurs hydrologiques

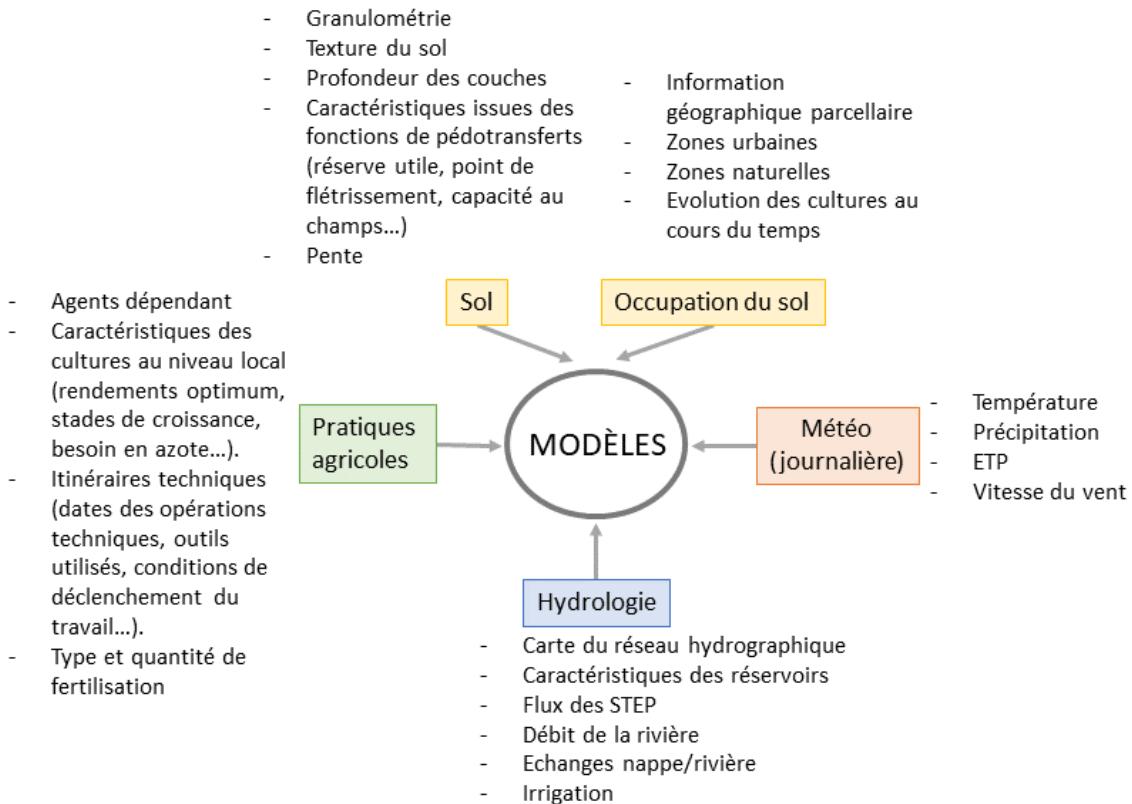


Figure 19. Exemple de données d'entrées des modèles agro-hydrologiques utilisés.

quantitatifs (débit d'étiage, concentrations en nitrates et en pesticides...) qui sont comparés aux seuils réglementaires qualitatifs (seuils correspondant au bon état des masses d'eau de la directive cadre sur l'eau et limite de potabilité) mais également par la productivité agricole basée sur les rendements des différentes cultures.

Le traitement des données climatiques à long terme est détaillé dans le [chapitre 3](#).

#### 4.2 Premier atelier : atteindre un diagnostic partagé sur les effets du changement climatique

##### *Construction et objectifs de l'atelier*

La problématique du changement climatique est intéressante car elle a des effets sur différentes composantes de l'agro-hydrosystème :

- agricole, avec par exemple des effets directs sur les récoltes, notamment à cause des événements extrêmes plus fréquents et intenses ([Seneviratne et al., 2021](#)), de la propagation des parasites avec l'augmentation généralisée des températures, de la fertilité des sols à cause de l'augmentation des températures qui augmente le taux de dégradation de la matière organique ([Reddy et al., 2015](#)).

- environnementales, avec par exemple la dégradation de la morphologie des rivières, l'augmentation d'événements de type étiage et inondation, la dégradation des communautés bactériennes ([O'Briain et al., 2019](#))

- sociales, notamment via le changement de pratiques induit par le changement climatique ([Nagargade et al., 2017](#)).

La construction des images, élément central de ce travail, repose sur le constat que les conditions hydro-climatiques ont déjà évolué et évolueront d'autant plus dans le futur.

Cet atelier a deux objectifs majeurs qui sont (i) d'arriver à un constat partagé sur la question climatique et (ii) de discuter de la perception personnelle et des potentiels changements de pratiques déjà engagés par les participants face au changement climatique

Les résultats de cet atelier sont détaillés dans le [chapitre 3](#).

#### 4.3 Deuxième atelier : construction d'images du territoire en 2070

##### *Construction et objectifs de l'atelier*

La sélection des participants est identique au premier atelier : tous les participants ciblés lors du premier atelier sont conviés, y compris ceux qui n'étaient pas présents.

Cet atelier a pour vocation de faire discuter les participants sur les notions de désirabilité et de soutenabilité, notamment sur les pratiques agricoles. Les participants sont guidés dans la construction de ces images. D'abord, les critères normatifs imposés sont des supports à ces discussions : les différents critères sont discutés collectivement afin d'aboutir à une définition commune de ces critères. Puis ils sont utilisés pour construire les fondations des images du territoire en 2070 en identifiant des ruptures par rapport à la situation actuelle. Ensuite, les discussions se focalisent sur la description des caractéristiques techniques de l'agro-hydrosystème (taille des exploitations, origines et apports en nutriments, irrigation) et grossièrement sur sa mise en place (quelles créations de filières ou de débouchées, quelles politiques publiques sont mises en place, comment est gérée la ressource en eau...). Les participants sont ensuite invités à détailler certaines conditions de faisabilité pour tendre vers un futur possible en 2070.

Cet atelier vise à accompagner les participants dans la production de récits de transition des pratiques agricoles à l'horizon 2070. Ces dires d'acteurs doivent être assez exhaustives pour pouvoir être transformée en données d'entrées de la modélisation.

#### 4.4 Transformation des dires d'acteurs en image

Les dires d'acteurs sont complétés postérieurement aux ateliers afin de les transformer en images robustes et cohérentes. On précise ainsi à la fois les variables internes de l'agro-hydrosystème (superficies des parcelles, localisation et types d'assoulements, gestion de la fertilisation et des traitements phytosanitaires, mise en œuvre de l'irrigation...) et les variables externes (les politiques publiques, les modes de gouvernance, le développement de filières...), qui servent à construire un récit sur un monde dans lequel le scénario est envisageable.

Ces récits sont ensuite traduits en données d'entrée des modèles agro-hydrologiques. La modélisation caractérise surtout les pratiques agro-hydrologiques. La partie des récits décrivant le système dans sa globalité n'est donc pas implantable dans les modèles choisis. Cette étape sert aussi à renseigner les indicateurs de soutenabilité du système préalablement identifiés (concentration de pesticides et de nitrates dans les eaux de surface et souterraines, temps de travail agricole, débit de la rivière, rendement des cultures...). La transformation des images en récits puis en jeux de données est détaillée dans le [chapitre 4](#).

*Tableau 5. Indicateurs clés extraits des images permettant d'évaluer le respect des critères normatifs imposés pour la création des images*

Critères normatifs	Indicateurs clés
Résilient au changement climatique	- Rendements (kg/ha)
Moins polluant	- Lixiviation d'azote (kgN/ha/an) - Lessivage de pesticide (g/ha/an)
Désirable professionnellement	- Temps de travail - Valorisation du métier - Autonomie et indépendance
Viable économiquement	- Rendements (kg/ha) - Diversification des revenus - Existence de filières - Soutien institutionnel

#### 4.5 Simulation des jeux de données

Après transformation en jeux de données, les différents récits sont modélisés par les modèles agro-hydrologiques. Les résultats sont ensuite traduits en indicateurs clés (Tableau 5) afin d'être présentés aux panels lors du dernier atelier. Les rendements servent à la fois d'indicateurs pour évaluer la résilience à long terme et la viabilité économique, puisqu'ils ne dépendent pas directement d'une logique économique globale susceptible d'avoir évolué d'ici 2070. Les résultats de modélisation sont détaillés dans le [chapitre 5](#).

#### 4.6 Troisième atelier : présentation des récits et mise en pratique du changement à court terme

##### *Construction et objectifs de l'atelier*

Cet atelier a été organisé en association avec l'Agence de l'eau et le syndicat de l'eau du territoire dans le cadre du CTEC, comme vu précédemment. Néanmoins, il peut être organisé de manière indépendante.

La configuration du dernier atelier se distingue par la réunion de l'ensemble des panels. Lors de cet atelier, les récits et les résultats des simulations sont présentés et discutés sous l'angle de leur soutenabilité, en prenant en compte : leur capacité d'adaptation aux changements globaux (notamment en termes de rendement et de pression sur les ressources) ainsi que leur désirabilité, notamment par rapport à l'évolution conjointe du métier d'agriculteur et de la société. Ces récits font ensuite l'objet d'une discussion collective visant à identifier les éléments marquants, ceux jugés désirables, et ceux perçus comme non viables ou non soutenables.

La seconde partie de l'atelier consiste à réfléchir collectivement à des actions à court terme, c'est-à-dire dans les 2 à 5 ans à venir, dans le cadre des récits présentés. Ces récits, supposés soutenables sont des objectifs vers lesquels les actions à court terme doivent tendre. L'organisation commune de cet atelier permet de proposer des actions potentiellement financables par l'Agence de l'eau ce qui donne de la matérialité aux propositions. Il est également possible d'adapter des outils issus du CTEC comme des aides pour le financement

de matériel, des financements au changement de pratique (conversion en agriculture biologique, entretien paysagers...) ou des développements de filières particulières.

Les objectifs de cet atelier sont de (i) présenter et discuter les images alternatives du territoire à l'horizon 2070 et les résultats des simulations, (ii) identifier des mesures et dispositifs particuliers qui permettent de parvenir à la réalisation des images à l'horizon 2070. Les résultats de cet atelier sont détaillés dans le [chapitre 6](#).

## Références

- Ahn, S. R., Jeong, J. H., & Kim, S. J. (2016). Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, 61(15), 2740-2753.
- Alcamo, J. (Ed.). (2008). *Environmental futures: the practice of environmental scenario analysis*. Elsevier.
- Allain, S., Plumecocq, G., & Leenhardt, D. (2020). Linking deliberative evaluation with integrated assessment and modelling: A methodological framework and its application to agricultural water management. *Futures*, 120, 102566.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Andreescu, L., Gheorghiu, R., Zulean, M., & Curaj, A. (2013). Understanding normative foresight outcomes: Scenario development and the 'veil of ignorance' effect. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4), 711-722.
- Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of planners*, 35(4), 216-224.
- Bai, X., Van Der Leeuw, S., O'Brien, K., Berkhout, F., Biermann, F., Brondizio, E. & Syvitski, J. (2016). Plausible and desirable futures in the Anthropocene: A new research agenda. *Global Environmental Change*, 39, 351-362.
- Barbier, R., & Larrue, C. (2011). Démocratie environnementale et territoires: un bilan d'étape. *Participations*, 1(1), 67-104.
- Barbier, R. (2021). L'épreuve d'acceptabilité sociale, ou la composition disputée du collectif 1. *Revue internationale de psychosociologie et de gestion des comportements organisationnels*, 27(69), 45-61.
- Barataud, F., Aubry, C., Wezel, A., & Mundler, P. (2014). Management of drinking water catchment areas in cooperation with agriculture and the specific role of organic farming. Experiences from Germany and France. *Land use policy*, 36, 585-594.
- Barendregt, L., Bendor, R., & Van Eekelen, B. F. (2024). Public participation in futuring: A systematic literature review. *Futures*, 158, 103346.
- Batellier, P. (2012). Revoir les processus de décision publique: de l'acceptation sociale à l'acceptabilité sociale. *Gaïa Presse*.
- Batlle-Aguilar, J., Brovelli, A., Porporato, A., & Barry, D. A. (2011). Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change. *Sustainable Agriculture Volume 2*, 499-527.
- Beck, M. B. (Ed.). (2002). Environmental foresight and models: a manifesto. Elsevier.
- Berlan-Darqué, M., & Mermet, L. (2009). Environnement: décider autrement: nouvelles pratiques et nouveaux enjeux de la concertation.
- Bhave, A. G., Mishra, A., & Raghuvanshi, N. S. (2014). A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options. *Journal of Hydrology*, 518, 150-161.
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M. & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115-130.
- Biermann, F., Abbott, K., Andresen, S., Bäckstrand, K., Bernstein, S., Betsill, M. & Zondervan, R. (2012). Navigating the Anthropocene: improving earth system governance. *Science*, 335(6074), 1306-1307.
- Biermann, F., Bai, X., Bondre, N., Broadgate, W., Chen, C. T. A., Dube, O. & Seto, K. C. (2016). Down to earth: contextualizing the Anthropocene. *Global Environmental Change*, 39, 341-350.
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B. & Sanz-Cobena, A. (2021). Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, 4(6), 839-850.

- Blennow, K., Persson, J., Tomé, M. and Hanewinkel, M. (2012). Climate Change: Believing and Seeing Implies Adapting. *PLoS ONE*, 7(11). e50182.
- Bodner, K., Fortin, M. J., & Molnár, P. K. (2020). Making predictive modelling ART: accurate, reliable, and transparent. *Ecosphere*, 11(6).
- Borch, K. (2013). The role of interaction in foresight. In *Participation and Interaction in Foresight* (pp. 3-14). Edward Elgar Publishing.
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K. H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723-739.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2004). Elements of the nature and properties of soils.
- Brisson, N., Wéry, J., & Boote, K. (2006). Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. *Working with Dynamic Crop Models*, Elsevier, Amsterdam, 257-279.
- Chateauraynaud, F. (2011). Argumenter dans un champ de forces. *Essai de balistique sociologique*.
- Chess, C., & Purcell, K. (1999). Public participation and the environment: Do we know what works?.
- Clivot, H., Misslin, R., Constantin, J., Tribouillois, H., Levavasseur, F., Houot, S. & Therond, O. (2021). AqYield-NC model documentation: Extension of the AqYield soil-crop model for simulating microbial processes involved in soil nitrogen and carbon fluxes in the MAELIA platform. *HAL*, 10, POD315.
- Compagnon, D., & Rodary, E. (2017). *Les politiques de biodiversité* (p. 253). Presses de Sciences Po.
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., Therond, O. (2015). The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology* (206), 55-68
- Cook, F. L., Page, B. I., & Moskowitz, R. (2013). Political participation by wealthy Americans. *Institute for Policy Research Northwestern University, Working Paper Series, April*.
- Coreau, A., Pinay, G., Thompson, J. D., Cheptou, P. O., & Mermet, L. (2009). The rise of research on futures in ecology: rebalancing scenarios and predictions. *Ecology letters*, 12(12), 1277-1286.
- Couturier, C., Charru, M., Doublet, S., & Pointereau, P. (2016). Afterres 2050 : un horizon pour l'agriculture et l'alimentation.
- Courant, D. (2020). La Convention citoyenne pour le climat: Une représentation délibérative. *Revue Projet*, (5), 60-64.
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. J. N. F. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature food*, 2(3), 198-209.
- Daniell, K. A. (2012). Co-engineering and participatory water management: organisational challenges for water governance.
- DeBoe, G. (2020). Impacts of agricultural policies on productivity and sustainability performance in agriculture: A literature review.
- Defrancesco, E. P. Gatto, F. Runge et S. Trestini. (2008). Factors affecting farmers' participation in agri-environmental measures : a northern Italian perspective, *Journal of Agricultural Economics*, vol 59, pp. 114–131.
- Delmotte, S., Couderc, V., Mouret, J. C., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J. M., & Hossard, L. (2017). From stakeholders narratives to modelling plausible future agricultural systems. Integrated assessment of scenarios for Camargue, Southern France. *European Journal of Agronomy*, 82, 292-307.
- Desrosières, A. (2008). L'argument statistique. Tome 1, Pour une sociologie historique de la quantification. *Lectures, Publications reçues*.
- Dow, K., Berkhout, F., Preston, B. (2013). Limits to adaptation. *Nature Clim Change* 3, 305–307.
- Elsawah, S., Pierce, S. A., Hamilton, S. H., Van Delden, H., Haase, D., Elmahdi, A., & Jakeman, A. J. (2017). An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological

systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environmental Modelling & Software*, 93, 127-145.

Elsawah, S., Filatova, T., Jakeman, A. J., Kettner, A. J., Zellner, M. L., Athanasiadis, I. N. & Lade, S. J. (2020). Eight grand challenges in socio-environmental systems modeling. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 2, 16226.

Elsawah, S., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Rothman, D., Schweizer, V., Trutnevyyte, E., & van Delden, H. (2020). Scenario processes for socio-environmental systems analysis of futures: a review of recent efforts and a salient research agenda for supporting decision making. *Science of the Total Environment*, 729, 138393.

Espeland, W. N., & Stevens, M. L. (2008). A sociology of quantification. *European Journal of Sociology/Archives européennes de sociologie*, 49(3), 401-436.

Etienne, M., Du Toit, D. R., & Pollard, S. (2011). ARDI: a co-construction method for participatory modeling in natural resources management. *Ecology and society*, 16(1).

Fourny, M. C., & Denizot, D. (2007). La prospective territoriale, révélateur et outil d'une action publique territorialisée. In *colloque de géographie sociale* (pp. 29-44). Presses Universitaires de Rennes.

Frooman, J. (1999). Stakeholder influence strategies. *Academy of management review*, 24(2), 191-205.

Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1990). Uncertainty and quality in science for policy (Vol. 15). Springer Science & Business Media.

Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7), 739-755.

Gallopin, G. C., & Rijsberman, F. (2000). Three global water scenarios. *International Journal of water*, 1(1), 16-40.

Ganivet, E. (2023). *Eau, territoires et changements globaux: vers une approche systémique et participative de modélisation pour concevoir et agir en complexité* (Doctoral dissertation, Université de Rennes).

Gaudin, J. (2013). 1. L'émergence de la participation : jalons historiques. Dans : J. Gaudin, *La démocratie participative* (pp. 9-45). Paris: Armand Colin.

Gaudou, B., Sibertin-Blanc, C., Therond, O., Amblard, F., Auda, Y., Arcangeli, J. P. & Mazzega, P. (2014). The MAELIA multi-agent platform for integrated analysis of interactions between agricultural land-use and low-water management strategies. In *Multi-Agent-Based Simulation XIV: International Workshop, MABS 2013, Saint Paul, MN, USA, May 6-7, 2013, Revised Selected Papers* (pp. 85-100). Springer Berlin Heidelberg.

Gendron, C. (2014). Penser l'acceptabilité sociale: au-delà de l'intérêt, les valeurs. *Communiquer. Revue de communication sociale et publique*, (11), 117-129.

Gendron, C., Yates, S., & Motulsky, B. (2016). L'acceptabilité sociale, les décideurs publics et l'environnement. Légitimité et défis du pouvoir exécutif. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 16(1).

Hallberg-Sramek, I., Nordström, E. M., Priebe, J., Reimerson, E., Mårald, E., & Nordin, A. (2023). Combining scientific and local knowledge improves evaluating future scenarios of forest ecosystem services. *Ecosystem Services*, 60, 101512.

Hamilton, S. H., ElSawah, S., Guillaume, J. H., Jakeman, A. J., & Pierce, S. A. (2015). Integrated assessment and modelling: overview and synthesis of salient dimensions. *Environmental Modelling & Software*, 64, 215-229.

Hannan, M. T., & Freeman, J. (1984). Structural inertia and organizational change. *American sociological review*, 149-164.

Hassenforder, E., Barreteau, O., Barataud, F., Souchère, V., Ferrand, N., & Garin, P. (2020). Enjeux et pluralité de la participation dans la gestion intégrée des ressources en eau. Eau et agriculture: gestion intégrée et gouvernance territoriale, Voltz, M., Burger Leenhardt, D., Barreteau, O.(ed.), Collection QUAE «Matière à débattre et décider.

- Hatzilacou, D., Kallis, G., Mexa, A., Coccossis, H., & Svoronou, E. (2007). Scenario workshops: A useful method for participatory water resources planning?. *Water resources research*, 43(6).
- Hervieu, B., & Purseigle, F. (2022). *Une agriculture sans agriculteur*. Presses de Sciences Po.
- Hideg, É. (2007). Theory and practice in the field of foresight. *Foresight*, 9(6), 36-46.
- Houet, T., Narcy, J. B., & Poux, X. (2009). Apport d'une démarche prospective pour la gestion de l'eau du bassin versant du Blavet (Bretagne). *Géoconfluences*.
- Inayatullah, S. (2008). Six pillars: futures thinking for transforming. *foresight*, 10(1), 4-21.
- Jiménez-Aceituno, A., Peterson, G. D., Norström, A. V., Wong, G. Y., & Downing, A. S. (2020). Local lens for SDG implementation: lessons from bottom-up approaches in Africa. *Sustainability Science*, 15, 729-743.
- IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Islam, G. (2022). Business ethics and quantification: Towards an ethics of numbers. *Journal of Business Ethics*, 176(2), 195-211.
- Jahel, C., Bourgeois, R., Bourgoin, J., De Lattre-Gasquet, M., Delay, E., Dumas, P. & Prudhomme, R. (2023). The future of social-ecological systems at the crossroads of quantitative and qualitative methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 193, 122624.
- Jarrige, F., & Le Roux, T. (2019). Naissance de l'enquête: les hygiénistes, Villermé et les ouvriers autour de 1840. *Les enquêtes ouvrières dans l'Europe contemporaine*, Paris, La Découverte, 39-52.
- Jensen, P. (2018). Pourquoi la société ne se laisse pas mettre en équations. Média Diffusion.
- Jones, M. (1985). Plant microclimate. In Techniques in bioproduction and photosynthesis (p. 26-40). Elsevier
- Jones, P. J. S., Burgess, J., & Bhattachary, D. (2001). *An evaluation of approaches for promoting relevant authority and stakeholder participation in European Marine Sites in the UK* (Vol. 1, p. 2).
- Julien, P. A., Lamonde, P., & Latouche, D. (1975). La méthode des scénarios en prospective. *L'Actualité économique*, 51(2), 253-281.
- Kahn, H., & Wiener, A. J. (1967). The next thirty-three years: A framework for speculation. *Daedalus*, 705-732.
- Kanda, E. K., Mabhaudhi, T., & Senzanje, A. (2018). Coupling hydrological and crop models for improved agricultural water management – a review. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(3).
- Kerr, R. B., Madsen, S., Stüber, M., Liebert, J., Enloe, S., Borghino, N. & Wezel, A. (2021). Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Security*, 29, 100540.
- Kitzinger, J. (1995). Qualitative research: introducing focus groups. *Bmj*, 311(7000), 299-302.
- Kläy, A., Zimmermann, A. B., & Schneider, F. (2015). Rethinking science for sustainable development: Reflexive interaction for a paradigm transformation. *Futures*, 65, 72-85.
- Kosow, H. (2015). New outlooks in traceability and consistency of integrated scenarios. *European Journal of Futures Research*, 3, 1-12.
- Kotamäki, N., Arhonditsis, G., Hjerpe, T., Hyttiäinen, K., Malve, O., Ovaskainen, O. & Heiskanen, A. S. (2024). Strategies for integrating scientific evidence in water policy and law in the face of uncertainty. *Science of the Total Environment*, 172855.
- Kunseler, E. M., Tuinstra, W., Vasileiadou, E., & Petersen, A. C. (2015). The reflective futures practitioner: Balancing salience, credibility and legitimacy in generating foresight knowledge with stakeholders. *Futures*, 66, 1-12.
- Labbouz, B., Lumbroso, S., Vial, I., & Lacroix, D. (2021). Biodiversité: visions et stratégies: Six visions pour préserver la biodiversité à l'horizon 2050. *Futuribles*, (2), 71-84.
- Lamb, W. F., Mattioli, G., Levi, S., Roberts, J. T., Capstick, S., Creutzig, F. & Steinberger, J. K. (2020). Discourses of climate delay. *Global Sustainability*, 3, e17.

- Lamine, C. (2011). Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *Journal of rural studies*, 27(2), 209-219.
- Leclerc, C., Bourassa, B., Picard, F., & Courcy, F. (2011). Du groupe focalisé à la recherche collaborative: avantages, défis et stratégies. *Recherches qualitatives*, 29(3), 145-167.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., & Davis, F. M. (1995). Modelling pesticide fate with GLEAMS. *European Journal of Agronomy*, 4(4), 485-490.
- Mau, S. (2020). Numbers matter! The society of indicators, scores and ratings. *International Studies in Sociology of Education*, 29(1-2), 19-37.
- Mermet, L., & Poux, X. (2002). Pour une recherche prospective en environnement. Repères théoriques et méthodologiques. *Nature Sciences Sociétés*, 10(3), 7-15.
- Merton, R. K. (1987). The focussed interview and focus groups: Continuities and discontinuities. *The Public opinion quarterly*, 51(4), 550-566.
- Mitlin, D. (2021). Editorial: Citizen participation in planning: From the neighbourhood to the city. *Environment and Urbanization*, 33(2), 295–309.
- Mora, O., Berne, J. A., Drouet, J. L., Le Mouél, C., & Meunier, C. (2023). Prospective: Agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050. Résumé.
- Morgan, D. L., Krueger, R. A., & King, J. A. (1998). The focus group guidebook. Sage.
- Nagargade, M., Tyagi, V., & Kumar, M. (2017). Climate smart agriculture: an option for changing climatic situation. *Plant Engineering by Snježana Jurić, IntechOpen*, 143-165.
- Neveu, C. (2011). Démocratie participative et mouvements sociaux: entre domestication et ensauvagement ?. *Participations*, 1(1), 186-209.
- Nikolova, B. (2014). The rise and promise of participatory foresight. *European Journal of Futures Research*, 2, 1-9.
- Noury, B., & Seguin, L. (2021). Participation et construction de l'acceptabilité sociale: fantasme ou réalité?. *Sciences Eaux & Territoires pour tous*, (35), 42-45.
- O'Briain, R. (2019). Climate change and European rivers: An eco-hydromorphological perspective. *Ecohydrology*, 12(5), e2099.
- Ogilvy, J. (2014). Emergence, story, and the challenge of positive scenarios. *World Futures*, 70(1), 52-87.
- OTAM. (1971). La France de l'an 2000. *Scénarios d'aménagement du territoire*, n°12, La documentation Française, p. 318
- Pahl-Wostl, C. (2008). Chapter five participation in building environmental scenarios. *Developments in Integrated Environmental Assessment*, 2, 105-122.
- Pateman, C. (1970). Participation and democratic theory. Cambridge University Press.
- Popper, R. (2008). How are foresight methods selected?. *foresight*, 10(6), 62-89.
- Poux, X., & Aubert, P. M. (2018). An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. *Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise, Iddri-AScA, Study*, 9, 18.
- Prell, C., Hubacek, K., Reed, M., Quinn, C., Jin, N., Holden, J. & Sendzimir, J. (2007). If you have a hammer everything looks like a nail: traditional versus participatory model building. *Interdisciplinary Science Reviews*, 32(3), 263-282.
- Preiser, R., Hichert, T., Biggs, R., van Velden, J., Magadzire, N., Peterson, G., & Benessaiah, K. (2024). Transformative foresight for diverse futures: the Seeds of Good Anthropocenes initiative. *Development Policy Review*, e12791.
- Queyrel, W., Habets, F., Blanchoud, H., Ripoche, D., & Launay, M. (2016). Pesticide fate modeling in soils with the crop model STICS: Feasibility for assessment of agricultural practices. *Science of the Total Environment*, 542, 787-802.
- Ramos, J., Sweeney, J.A., Peach, K., & Smith, L. (2019). Our futures: By the people, for the people. Nesta.

- Raskin, P., Gallopin, G., Gutman, P., Hammond, A., & Swart, R. (1998). Bending the curve: toward global sustainability (Vol. 8). Stockholm: Stockholm Environment Institute. scenarios: a new scenario typology. *Environmental Research Letters*, 3(4), 045017.
- Raven, P. G. (2015). Imagining the impossible: The shifting role of utopian thought in civic planning, science fiction, and futures studies. *Journal of Futures Studies*, 20(2), 113-122.
- Raymond, C. M., Fazey, I., Reed, M. S., Stringer, L. C., Robinson, G. M., & Evely, A. C. (2010). Integrating local and scientific knowledge for environmental management. *Journal of environmental management*, 91(8), 1766-1777.
- Rawls, J. (2005). Political Liberalism. *Columbia University Press*, New York.
- Réchard-Spence, D. (2019). La prospective stratégique au Parlement européen. *Futuribles*, (5), 55-63.
- Reddy, P. P., & Reddy, P. P. (2015). Impacts of climate change on agriculture. *Climate resilient agriculture for ensuring food security*, 43-90.
- Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: a literature review. *Biological conservation*, 141(10), 2417-2431.
- Reed, M. S., Kenter, J., Bonn, A., Broad, K., Burt, T. P., Fazey, I. R. & Ravera, F. (2013). Participatory scenario development for environmental management: A methodological framework illustrated with experience from the UK uplands. *Journal of environmental management*, 128, 345-362.
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F. & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), eadh2458.
- Riley, M. E. (2015). Evidence-based quantification of uncertainties induced via simulation-based modeling. *Reliability Engineering & System Safety*, 133, 79-86.
- Rinaudo, J. D., Maton, L., Terrason, I., Chazot, S., Richard-Ferroudji, A., & Caballero, Y. (2013). Combining scenario workshops with modeling to assess future irrigation water demands. *Agricultural Water Management*, 130, 103-112.
- Roche, P. A., Miquel, J., & Gaume, E. (2012). *Hydrologie quantitative: Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Science & Business Media.
- Rowe, G., & Frewer, L. J. (2000). Public participation methods: a framework for evaluation. *Science, technology, & human values*, 25(1), 3-29.
- Ruane, A. C., Rosenzweig, C., Asseng, S., Boote, K. J., Elliott, J., Ewert, F. & Thorburn, P. J. (2017). An AgMIP framework for improved agricultural representation in integrated assessment models. *Environmental Research Letters*, 12(12), 125003.
- Saujot, M., Dubuisson-Quellier, S., Martin, S., Barbier, C., Pourouchottaminh, P., Pascal, C. & Julien, D. (2022). *Pour une meilleure intégration des dimensions sociales et des modes de vie dans les exercices de prospective environnementale* (Doctoral dissertation, Iddri-Sciences Po).
- Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., Von Gunten, U., & Wehrli, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annual review of environment and resources*, 35(1), 109-136.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D. & Allan, R. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate.
- Shiferaw, H., Gebremedhin, A., Gebretsadkan, T., & Zenebe, A. (2018). Modelling hydrological response under climate change scenarios using SWAT model: the case of Ilala watershed, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 437-449.
- Smith, G. (2017). Concevoir la démocratie pour le long terme : innovation institutionnelle et changement climatique. *La Pensée écologique*.
- Stirling, A. (2006). Analysis, participation and power: Justification and closure in participatory multi-criteria analysis. *Land Use Policy*, 23, 95–107.
- Soubeyroux, J. M., Dubuisson, B., Josse, P., Régimbeau, M., Ribes, A., & Sorel, M. (2023). Changement climatique et extrêmes récents dans l'est de la France.
- Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (1994). Integration of a basin-scale water quality model with GIS 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 30(3), 453-462.

- Stratigea, A., & Papadopoulou, C. A. (2013). Foresight analysis at the regional level-a participatory methodological framework. *Journal of Management and Strategy*, 4(2), 1-16.
- Therond, O., Sibertin-Blanc, C., Lardy, R., Gaudou, B., Balestrat, M., Hong, Y. & Mazzega, P. (2014). Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems.
- Thiriot, S. (2022). Transition écologique: quels projets de société? Les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME au prisme des réactions citoyennes. *Futuribles*, (6), 53-69.
- Thiriot, S. (2022). Retour sur l'étude « Modes de vie est prospective » de l'Ademe, dans Pour une meilleure intégration des dimensions sociales et des modes de vie dans les exercices de prospective environnementale. Iddri-Sciences Po.
- Thornton, P. E., Lamarque, J. F., Rosenbloom, N. A., & Mahowald, N. M. (2007). Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO<sub>2</sub> fertilization and climate variability. *Global biogeochemical cycles*, 21(4).
- Tournebize, J., Seguin, L., Bouarfa, S., Chaumont, C., Lebrun, J., Melion-Delage, R. & Rougier10, J. E. (2017). Projet Brie'EAU: des outils de dialogue territorial pour mutualiser les services écosystémiques (qualité de l'eau et biodiversité). *PIREN-Seine, Paris, France*.
- van Bruggen, A., Nikolic, I., & Kwakkel, J. (2019). Modeling with stakeholders for transformative change. *Sustainability*, 11(3), 825.
- van Vliet, M., Kok, K., & Veldkamp, T. (2010). Linking stakeholders and modellers in scenario studies: The use of Fuzzy Cognitive Maps as a communication and learning tool. *Futures*, 42(1), 1-14.
- Voinov, A., & Bousquet, F. (2010). Modelling with stakeholders. *Environmental modelling & software*, 25(11), 1268-1281.
- Voinov, A., Kolagani, N., McCall, M. K., Glynn, P. D., Kragt, M. E., Ostermann, F. O. & Ramu, P. (2016). Modelling with stakeholders—next generation. *Environmental Modelling & Software*, 77, 196-220.
- Von Bloh, W., Schaphoff, S., Müller, C., Rolinski, S., Waha, K., & Zaehle, S. (2018). Implementing the nitrogen cycle into the dynamic global vegetation, hydrology, and crop growth model LPJmL (version 5.0). *Geoscientific Model Development*, 11(7), 2789-2812.
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., Van Der Sluijs, J. P., Van Asselt, M. B., Janssen, P., & Krämer von Krauss, M. P. (2003). Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated assessment*, 4(1), 5-17.
- Wigner, E. P. (1990). The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. In *Mathematics and science* (pp. 291-306).
- Wilkinson, A. (1998). Empowerment: theory and practice. *Personnel review*, 27(1), 40-56.
- Wilkinson, A. & Eidinow, E. (2008). Evolving practices in environmental
- Zabel F, Putzenlechner B, Mauser W (2014) Global Agricultural Land Resources – A High Resolution Suitability Evaluation and Its Perspectives until 2100 under Climate Change Conditions. *PLoS ONE* 9(9): e107522.



## Chapitre 2 : Caractériser l'agro-hydrosystème étudié

Ce chapitre s'articule autour de deux objectifs. D'une part, il propose une première caractérisation du site d'étude, la Souffel, dans le cadre d'une analyse du socio-agro-hydrosystème. D'autre part, il vise à distinguer les spécificités territoriales et les données locales des éléments génériques qui constituent la base de la caractérisation d'un territoire dans une étude agro-hydrologique. Ce chapitre vise à répondre à la question de recherche présentée précédemment qui est :

- L'étude des spécificités territoriales dans le cadre de cette méthode a-t-elle une signification particulière pour l'étude ? pour les acteurs locaux ?

Puis, plus globalement à la question de recherche relative à la possibilité de produire un travail frugal.

Le chapitre débute par une présentation générale du territoire, qui met en évidence les principales problématiques qui s'y posent. Une attention particulière est accordée à la dimension agricole, en détaillant ses caractéristiques et les dynamiques ayant conduit à la configuration actuelle de l'agrosystème. Ensuite, l'analyse hydrologique du territoire est présentée. Elle décrit l'état quantitatif et qualitatif des ressources en eau, ainsi que les dispositifs mis en place pour atténuer les pressions agricoles sur la rivière. Ces éléments constituent des apports essentiels au diagnostic partagé et permettent d'identifier les freins et leviers à l'évolution des pratiques agricoles sur un territoire donné. Enfin, la dernière partie est consacrée aux acteurs locaux et à la méthodologie de constitution des différents panels.

Chaque section suit une structure identique articulée autour de trois axes :

1. **Cadre méthodologique** : Présentation des enjeux principaux de l'étude d'un objet et des sources de données disponibles.
2. **Application à la Souffel** : Présentation des spécificités du territoire étudié et des informations complémentaires au cadre méthodologique recueillies.
3. **Analyse critique** : Évaluation de la pertinence des données obtenues, de leur contribution à la méthode et de l'apport des informations supplémentaires.

### *Localisation du site d'étude*

Le bassin versant de la Souffel est situé dans le Bas-Rhin en région Grand-Est (67), à une dizaine de kilomètres de la ville de Strasbourg (Figure 20) au sein du Kochersberg (Figure 24). Le territoire de 120 km<sup>2</sup> étudié regroupe 36 communes pour environ 26 000 habitants. Il fait partie de la région naturelle du Kochersberg, où on retrouve les terres parmi les plus fertiles d'Europe. Il s'agit d'un territoire dont l'occupation du sol est largement agricole et représente plus de 70 % du territoire (Figure 21). Une part du territoire est également dédiée aux zones urbaines, incluant les 36 centres urbains, les axes routiers et les sites industriels et de stockage de déchet. Comme ailleurs en France, les espaces agricoles se transforment progressivement en zones urbaines. Le dernier exemple est le Grand Contournement Ouest (GCO), dont la construction a entraîné la disparition de 41,3 hectares de terres agricoles en 2020 (selon l'étude d'impact de l'Atelier des Territoires, publiée en 2024).

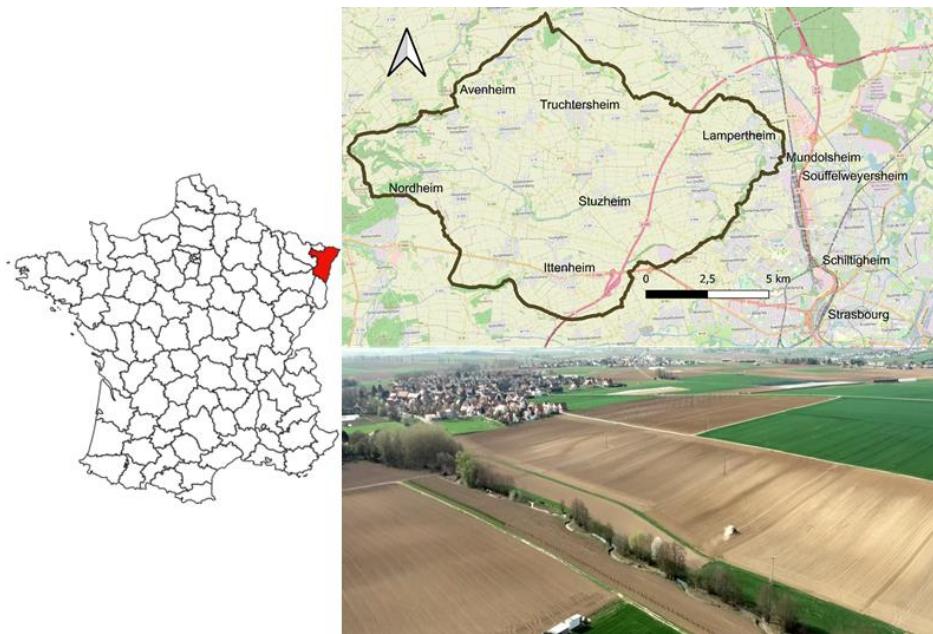


Figure 20. Localisation du bassin versant de la Souffel et illustration d'une portion renaturée proche de Stuzheim.

La proximité de ce territoire avec le centre dynamique de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) redessine ses dynamiques. Il accueille de plus en plus de travailleurs de l'EMS qui souhaitent s'installer en périurbanisation de couronne, ce qui entraîne l'extension des villages par des zones pavillonnaires. Les espaces naturels sont extrêmement minoritaires avec 0,3% seulement de la superficie totale du territoire. La rivière de la Souffel s'étend sur 79 km de linéaire. Son faible débit annuel moyen de 0,3 m<sup>3</sup>/s s'explique par son régime exclusivement pluvial sans composante vosgienne. Ce faible débit limite la capacité de dilution des polluants (nitrates, pesticides...) par la rivière, ce qui explique en partie les fortes concentrations de polluants mesurées ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)). Cette rivière peut être sujette aux crues lors de gros épisodes orageux et aux très forts étiages en été, soutenus parfois entièrement par les rejets des stations d'épuration (STEP) avec par exemple un pic à 122% du débit observé ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)). La rivière de la Souffel se jette ensuite dans l'Ill à Mundolsheim, qui se jette à son tour dans le Rhin.

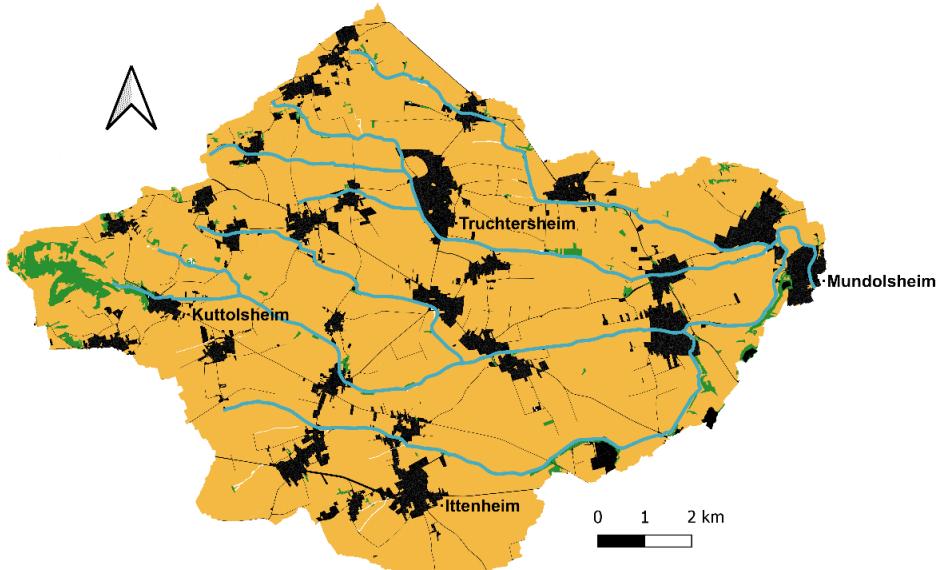
## 1. Diagnostic agro-territorial

### 1.1 Caractérisation des sols et du climat

#### ***Caractéristiques des sols***

##### A. Cadre méthodologique générique

La caractérisation des sols est cruciale pour comprendre les trajectoires agricoles depuis l'après-guerre et pour utiliser les modèles agro-hydrologiques. Le sol présente plusieurs paramètres indispensables à la quantification des processus agro-hydrologiques, tels que le ruissellement, les écoulements, l'infiltration, l'évolution de la réserve utile et la croissance des cultures ([Arnold et al., 2013](#)).



**Occupation du sol (2018)**

- Zones agricoles
- Zones urbaines
- Zones naturelles
- Rivière de la Souffel

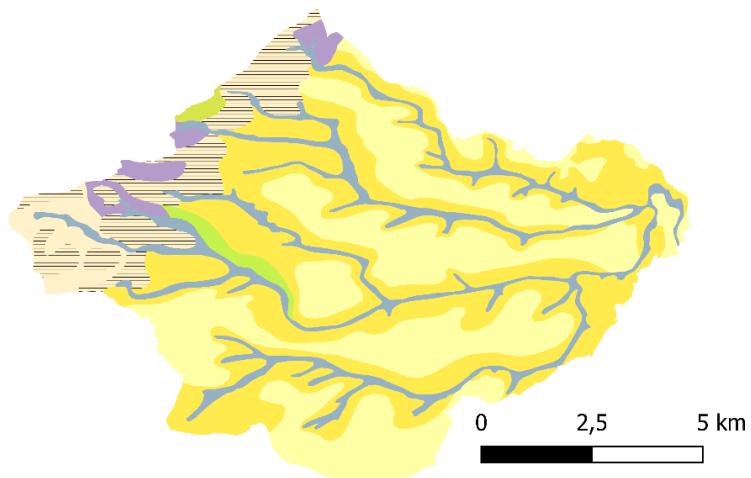
*Figure 21. Occupation du sol du territoire.*

Les données pédologiques sont accessibles dans les banques régionales ou départementales et se présentent généralement sous forme de cartes à l'échelle 1/250 000, basées sur des classifications homogènes à l'échelle nationale. À partir de données de base comme la texture (concentrations de sable, d'argile et de limon), la quantité de matière organique, la densité et la fraction de gravier, il est possible de calculer, à l'aide de fonctions de pédotransfert, divers paramètres essentiels à la modélisation agro-hydrologique (i.e. point de flétrissement, capacité au champ, taux de saturation, densité apparente, densité de la matrice du sol, teneur en eau des plantes et conductivité à saturation) ([Saxton & Rawls, 2006](#)).

#### B. Application au cas d'étude

Les sols de la Souffel présentent une fertilité élevée, ce qui favorise le développement important de l'agriculture sur le territoire (Figure 22). Leur fertilité est liée à la présence de lœss, essentiellement constitué de fines particules limoneuses contenant des proportions moindres d'argile et de sable. Le lœss retient efficacement les nutriments indispensables à la croissance des cultures, tandis que les particules argileuses retiennent durablement l'eau dans les pores du sol. Sur le plateau du Kochersberg, la grande profondeur des formations pédologiques offre une réserve utile significative ([Lefrancq et al., 2017](#)).

Ces caractéristiques influencent directement les pratiques agricoles car elles favorisent un équilibre entre des rendements élevés et un faible besoin d'irrigation, notamment pour les cultures céréalières ([Catt, 2011](#)). En effet, seulement 5 % des surfaces agricoles utiles (SAU) sont irriguées sur l'ensemble du Kochersberg (PLUi de la CoCoKo). Cependant, l'usage intensif



- Sols bruns calcaires décarbonatés limono-sablo-argileux à argilo-limono-sableux
- Sols bruns calcaires limoneux profonds sur loess
- Sols bruns calcaires limono-argilo-sableux à argileux
- Sols bruns calcaires, argilo-limono-sableux
- Sols bruns profonds hydromorphes calciques faiblement lessivés limono-argileux à argilo-limoneux
- Sols bruns calciques pélosols hydromorphes argilo-limoneux à argileux
- Sols bruns calciques limono-argileux profonds sur loess
- Sols bruns profonds hydromorphes colluviaux décarbonatés limono-argileux à argileux

Figure 22. Carte des sols et spécification de leurs caractéristiques sur le territoire de la Souffel (Source

depuis les années 1960 a progressivement dégradé cette qualité. Par exemple, l'emploi croissant d'engins lourds provoque la formation de croûtes de battance dues au tassement, ce qui nuit à la biodiversité du milieu pédologique ([Shokati & Ahangar, 2014](#)).

Si les particules limoneuses garantissent une fertilité accrue, leur présence augmente également le risque de ruissellement et d'érosion. En l'absence de couverture végétale, l'impact des précipitations favorisent la formation de croûtes de battance qui réduisent fortement la capacité d'infiltration, passant de plusieurs dizaines de mm/h à quelques mm/h ([Lefrancq et al. 2017](#)). Ainsi la présence de sols nus, en particuliers lors des pluies automnales et au début du printemps, affecte directement la fertilité des sols car elle favorise le processus d'érosion et donc de perte de matière organique via les ruissellements et les coulées de boue engendrées ([Van Dijk et al., 2009](#) ; [DREAL Alsace, 2014](#)). Par ailleurs, les pratiques agricoles sur le bassin versant restent invasives, caractérisées par des labours profonds et l'utilisation fréquente d'engins lourds. Les méthodes de conservation sont encore peu généralisées.

### C. Analyse critique

Les caractéristiques pédologiques expliquent l'essor agricole important sur la Souffel et la possibilité de produire de manière intensive. Sur le bassin, les pratiques de conservation des sols restent peu adaptées malgré les risques élevés de coulées de boue et d'érosion. Ce constat souligne la complexité du changement d'itinéraire technique, un obstacle majeur à la préservation des sols. Ce même frein limite aussi l'amélioration de la qualité de l'eau. Toutefois, la fertilité des sols offre une large gamme de cultures possibles. Cette richesse est un moyen d'envisager une grande diversité de pratique agricole et de culture dans les scénarios prospectifs comme le nôtre.

## **Climat et données météorologiques passé et présent du territoire**

### **A. Cadre générique**

En plus des données pédologiques, le climat joue un rôle clé dans le fonctionnement agricole d'un territoire. L'analyse des tendances climatiques passées est essentielle pour préparer l'atelier de diagnostic partagé avec les acteurs. La collecte de données journalières sert aussi à alimenter les modèles agro-hydrologiques. Ces modèles, en générant des chroniques de débits passés et présents, peuvent ainsi être calibrés et validés avec précision. Les projections climatiques permettront ensuite de forcer les futures images pour simuler l'évolution de l'hydrologie du bassin versant et des rendements en fonction de l'adaptation des itinéraires techniques (dates de semis, récoltes, matériel utilisé...) ([Anderson et al., 2020](#) ; [Nagargade et al., 2017](#)). Comprendre les tendances climatiques passées et futures est crucial pour encourager l'adoption de nouvelles pratiques ([Reed et al., 2008](#) ; [Blennow et al., 2012](#)). Ces tendances sont établies à partir des bases de données nationales produites par Météo France. Elles intègrent des mesures en stations au sol ainsi que des données interpolées et modélisées par le modèle Safran sur un maillage de 8 x 8 km.

### **B. Application au cas d'étude**

Le climat de la région est un climat continental assez sec, avec des précipitations annuelles cumulées d'environ 700 mm. Les pluies estivales sont importantes, souvent caractérisées par des cellules orageuses (Figure 23). La recharge des nappes et des réserves utiles est assurée le reste des mois de l'année par des pluies de plus faibles intensités ([Rathay et al., 2018](#)). Du fait du climat continental, l'écart des températures est assez important entre les périodes hivernales et estivales. Cet écart de température restreint d'une part les options de cultures disponibles en raison des contraintes imposées par le gel, qui réduit la survie des tiges, et d'autre part freine la reproduction des plantes par la chaleur excessive ([Sadok et al., 2022](#)).

Les tendances climatiques évoluent à cause des effets du changement climatique (Figure 23). Le diagramme ombrothermique montre une différence de tendances climatiques fortes entre les décennies 1950-1960 (de couleurs claires) et 2010-2020 (de couleurs sombres). On observe une augmentation systématique des températures mensuelles, avec des écarts supérieurs à 2°C, d'autant plus marqués en juillet et août. Concernant les pluies, on constate un changement important du régime de précipitation, mais pas de modification dans le cumul total. Les étés ont tendances à être plus secs, de l'ordre de 10 à 15 mm par mois, alors que les automnes sont plus pluvieux. L'augmentation des pluies automnales coïncide avec la période post-moisson où les sols sont nus, ce qui favorise l'érosion des terres agricoles. Les cellules orageuses qui étaient auparavant caractéristiques des mois d'été (juillet et août) sont plus précoces dès le mois de mai. Les conséquences du changement de régime de précipitation couplées à une augmentation générale des températures entraînent un besoin croissant d'irrigation des parcelles agricoles en été ([Islam & Karim, 2019](#)). Ce phénomène touche particulièrement les parcelles maraîchères mais aussi plus récemment les grandes cultures sur la Souffel. En plus de l'évolution saisonnière des températures et précipitation, on observe dans la région une multiplication d'événements extrêmes ([Soubeyroux et al., 2023](#)), qui ont des effets directs sur la productivité des cultures, comme le gel tardif, les forts épisodes de grêles et les vagues de chaleur.

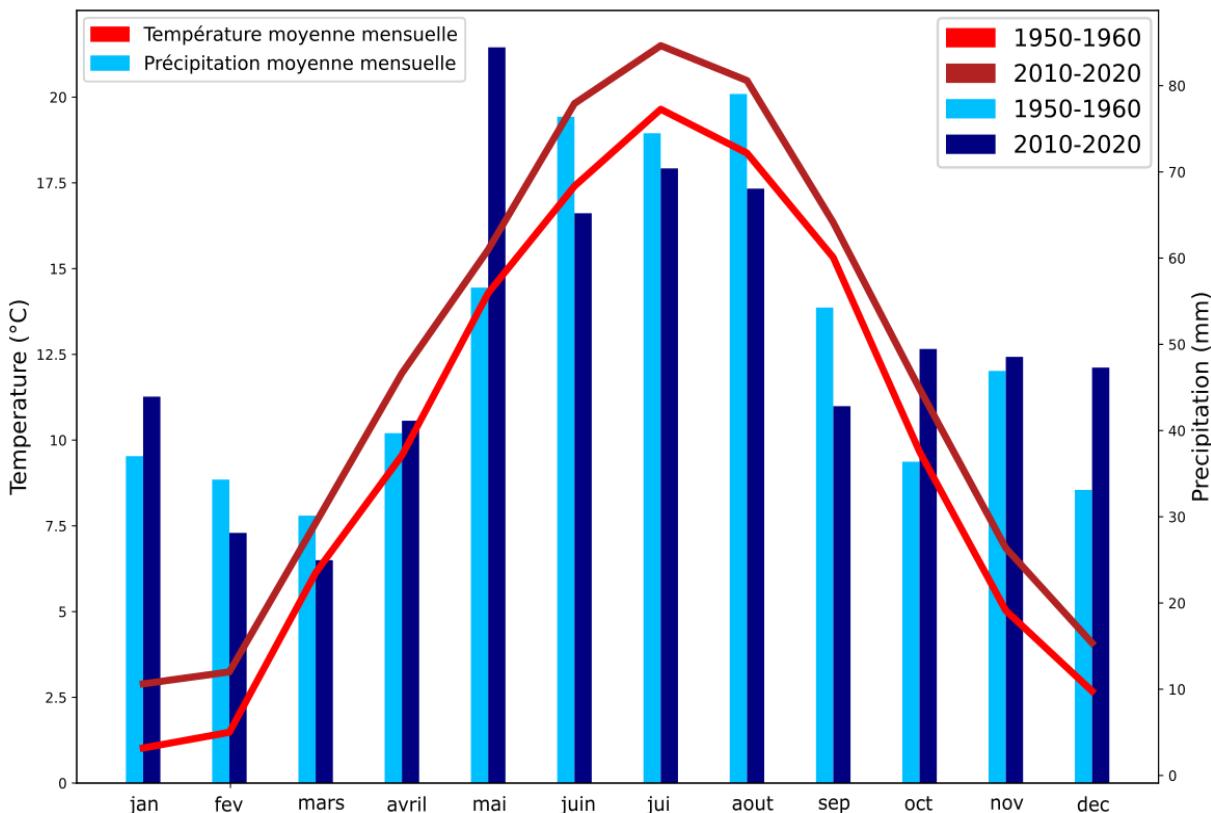


Figure 23. Diagramme ombrothermique de comparaison de la moyenne mensuelle de la température et de la somme des mensuelle des précipitations moyennées sur dix ans pour les deux périodes (1950-1960) et (2010-2020), basé sur les données de la station météo d'Entzheim (MétéoFrance).

### C. Analyse critique

L'analyse de ces tendances permet d'évaluer l'évolution du climat sous l'effet du changement climatique. Les effets et l'intensité du changement climatique varient selon les régions et affecte différemment la température et les précipitations. Comparer deux périodes aide à mieux caractériser ces évolutions et à confronter et souvent corroborer les observations des acteurs, notamment agricoles. Cela facilite les discussions lors des ateliers. L'étude des tendances climatiques a notamment révélé une hausse des besoins en eau pour l'irrigation, confirmée sur le terrain par la multiplication des projets d'irrigation.

#### 1.2 Diagnostic agraire historique

Le choix des cultures n'est pas seulement guidé par les caractéristiques pédologiques et climatiques, il est aussi le résultat d'opportunités qui se présentent ou qui se construisent localement. Cette partie présente en quoi une analyse de l'évolution des cultures produites sur un territoire est une donnée importante dans la caractérisation d'un agro-hydrosystème. Ce type d'analyse est à conduire sur chaque territoire à enjeu sur lequel on souhaiterait transposer l'approche développée dans cette thèse.

### A. Cadre Générique

Cette analyse est un moyen de comprendre les dynamiques sociales, passées et actuelles, ainsi que l'influence politique et syndicale exercée par les acteurs agricoles dans la région. Elle offre

une vue d'ensemble du territoire, facilitant ainsi le dialogue avec les acteurs locaux sur leurs pratiques et les raisons qui motivent leurs choix. L'étude de l'évolution des cultures agricoles pointe les principaux facteurs déterminant le choix des cultures sur le territoire. Ces facteurs sont cruciaux pour comprendre le territoire, mais aussi indispensables à connaître si l'on veut les mobiliser afin de modifier les pratiques agricoles, notamment pour introduire de nouvelles cultures, comme c'est le cas dans cette méthode.

Reconstituer l'histoire agricole d'un territoire n'est pas toujours possible pour chaque région. Cela dépend avant tout des données disponibles, qui peuvent parfois être parcellaires. Si le Kochersberg constitue un exemple d'étude où de nombreuses recherches sont accessibles, ce n'est pas le cas pour tous les territoires. La majorité des documents cités sont des archives anciennes, dont une partie est conservée à la Bibliothèque nationale et n'est donc accessible que par ce biais. Un autre atout considérable est la présence d'un diagnostic agraire clair et détaillé récent. Si ces diagnostics ne sont pas directement accessibles, il peut être utile de contacter la chambre d'agriculture pour vérifier s'il en existe un pour la zone étudiée.

## B. Application au cas d'étude

Cette partie s'appuie partiellement sur le diagnostic agraire du Kochersberg de Maxime Legrand (2020) basé sur des entretiens avec des exploitants, dont beaucoup sont à la retraite, et des membres de coopératives. Il s'appuie également sur des sources historiques basées sur le Kochersberg et sur des données quantitatives plus récentes fournies par les bases de données agreste et l'Insee.

### ***XVIIIe siècle : La révolution fourragère augmente la rentabilité de la polyculture-élevage***

Le Kochersberg, surnommé le « grenier à blé » de Strasbourg, est une région agricole historique (Figure 24). La révolution fourragère du XVIIIe siècle transforme les pratiques en Alsace comme ailleurs en France. L'essor des cultures fourragères, dont les céréales, favorise à la fois le développement de l'élevage et l'intensification des cultures. La transhumance disparaît au profit de la stabulation, et le fumier récupéré enrichit les sols, améliorant les rendements. Le bétail, d'abord utilisé pour le labour, devient aussi une source de production animale. La pratique de la jachère morte, temps pendant lequel les champs étaient laissés en friches pour se régénérer, disparaît au profit des légumineuses comme la luzerne, qui échappent à la dîme et offrent un avantage fiscal. L'agriculture reste vivrière, mais la hausse des rendements et des cheptels pousse de plus en plus de paysans à vendre des produits animaux dès la fin du XVIIIe siècle. La polyculture-élevage se généralise alors sur le territoire.

### ***XIXe à la fin de la seconde guerre mondiale : fluctuation des cultures en fonction des marchés agricoles nationaux***

En Alsace, les changements de nationalité après les guerres prussiennes et le traité de Versailles influencent fortement les choix agricoles (Kapp & Schaefer, 1965). Les cultures varient selon la demande des marchés allemand et français. L'Allemagne privilégie les cultures maraîchères comme l'asperge, la pomme de terre et le chou, ainsi que le houblon (Juillard, 1959). La demande en viande transformée, notamment porcine, et en produits laitiers est forte. En 1883, l'administration allemande crée la sucrerie d'Erstein, favorisant la culture de la betterave sucrière (Zeyl, 1930). Après 1918, le marché français délaisse le maraîchage,

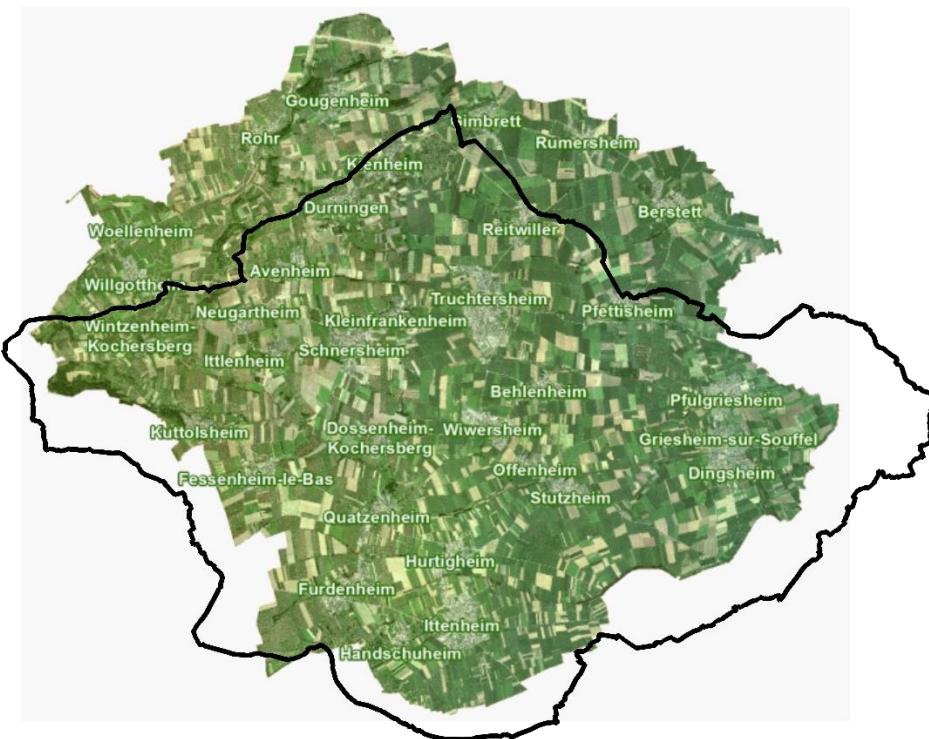


Figure 24. Présentation des villages de la communauté de communes du Kochersberg (CocoKo) et contour de la zone étudiée en noir, le bassin versant de la Souffel.

fourni par les territoires plus au Sud, au profit de la vigne (vins et crémant) et de la betterave sucrière, toujours vendue via l'usine d'Erstein, dont la pulpe sert aussi d'alimentation animale. La production laitière se maintient grâce aux infrastructures allemandes existantes. L'État instaure un monopole sur le tabac et fixe son prix sur un marché interne, ce qui standardise la production et augmente les surfaces cultivées. Peu exigeante et rentable sur de petites parcelles, cette culture devient une des cultures principales. Le houblon recule en raison des droits de douane élevés pour l'exportation allemande, bien que les brasseries alsaciennes en absorbent une partie ([Zeyl, 1930](#)).

Dès les années 1910, la spéculation sur les prix agricoles apparaît, mais les ventes, notamment de céréales, restent à plus de 80 % gérées par les coopératives agricoles ([Juillard, 1959](#)). L'agriculture du Kochersberg repose sur un système de polyculture-élevage, rentable même sur de petites surfaces grâce à la fertilité des sols.

Après 1945, trois types de fermes coexistent ([Juillard, 1959](#)) :

- Les fermes *familiales*, de petite taille, où l'intégralité des travaux sont réalisés par la famille. Elles cultivent principalement le tabac et la betterave sucrière, assurant des revenus suffisants malgré la faible superficie.
- Les exploitations *patronales*, plus grandes, emploient des ouvriers agricoles pour effectuer une part des tâches. Elles se spécialisent dans le houblon et la betterave sucrière.
- Les exploitations *capitalistes*, entièrement fondées sur une main-d'œuvre salariée, appartiennent à des négociants. Elles produisent des céréales stockables, du lait avec un important cheptel et du houblon. L'exode rural et la hausse des salaires poussent nombre d'entre elles à se spécialiser dans la production laitière ou à céder la place à des industries plus rentables.

#### ***La réforme de la PAC : la politique agricole gouverne les choix de culture***

Après les années 1950, les dynamiques agricoles sont chamboulées par la mise en place conjointe de la politique agricole commune (PAC) et d'un marché agricole européen. Les politiques de modernisation restructurent les pratiques : mécanisation, engrais chimiques, pesticides, semences sélectionnées, spécialisation et standardisation. Les agriculteurs privilégient certaines cultures aux prix garantis, comme les céréales et le lait. Ces investissements diminuent le travail par hectare et permettent l'agrandissement des exploitations. Ces investissements portés dans le secteur agricole français entraînent une baisse de la charge de travail par hectare et l'agrandissement des exploitations.

Dans le Kochersberg, comme ailleurs, les petites exploitations non mécanisées sont remembrées, augmentant considérablement la taille moyenne des parcelles qui passe de 10 ares au XIX<sup>ème</sup> siècle ([Juillard, 1953](#)) à 3 ha en 1965 ([Lerch et al., 1983](#)). Les exploitations se spécialisent dans les céréales, la betterave sucrière et le lait. Deux types d'exploitations dominent : les exploitations *familiales*, avec des surfaces variables de 3 à 25 ha ([Lerch et al., 1983](#)) et les exploitations *patronales* qui emploient toujours des saisonniers. La raréfaction de la main d'œuvre, causée par l'exode rural, augmente le coût du travail ce qui entraîne la fermeture des dernières exploitations *capitalistes*. Cela conduit aussi au déclin de la culture du houblon, bien que la région du Kochersberg soit une des seules où elle se maintient en Alsace ([Juillard, 1959](#)).

Cette région est également particulière en raison de l'implication très importante des agriculteurs dans les organisations économiques, syndicalistes (FDSEA, JAC, CNJA) et politiques (en 1959, les 34 communes du Kochersberg ont des maires agriculteurs et 90 % des élus municipaux sont des agriculteurs, élus de la Chambre d'agriculture). Leur pouvoir se traduit notamment par le nombre important de coopératives agricoles de ventes (laitière, céréales, machines, sucrerie, tabac...) ([Nonn, 1985](#)).

### ***Mise en place des coopératives agricoles et importance croissante du marché agricole sur le choix des cultures***

Dans les années 1970, le maïs s'impose dans les rotations agricoles ([Ritz-Bruppacher, 1981](#)). Les sols fertiles et profonds favorisent une hausse des rendements sans irrigation : le maïs grain passe de 5-20 qx/ha en 1945 à 25-45 qx/ha en 1965 ([Godard, 1967](#)). Trois cultures dominent, soit en monoculture, soit en rotations pauvres (e.g rotations rapides incluant peu de cultures diversifiées) : le maïs et le blé, qui sont stockables et revendables, et la betterave sucrière, dont la production est sécurisée après le rachat de la sucrerie d'Erstein en coopérative dans les années 1980. L'élevage laitier reste présent, soutenu par la PAC, et les cheptels augmentent avec la mécanisation. Toutefois, les petites exploitations peinent à rester compétitives et doivent s'agrandir pour rester rentables. Celles qui ne le peuvent pas se tournent vers l'élevage à viande (porcs, bovins, volailles) associé aux grandes cultures, principalement le maïs. Dans les années 1990, une coopérative de producteurs de viande facilite cette transition en investissant dans des infrastructures communes, dont des abattoirs. En parallèle, les quotas laitiers accélèrent la concentration des exploitations, favorisant celles déjà modernisées.

Les cultures industrielles (betterave, tabac, houblon...) progressent dans les années 1980 grâce à la mutualisation du matériel et aux centres de transformation partagés. Le houblon se maintient grâce à un contrat avec une brasserie américaine, bien qu'il se concentre

progressivement dans des exploitations plus grandes (10 à 20 ha) dans les années 1990. À l'inverse, la culture du tabac recule, la demande privilégiant le tabac blond au détriment du noir. Cependant, les aides de la coopérative tabacole et le soutien européen dans les années 1990 favorisent la poursuite de la production pour certaines exploitations. De petites fermes de moins d'un hectare apparaissent, spécialisées en maraîchage pour approvisionner Strasbourg. Les CUMA restent peu présentes, car les travaux nécessitant du matériel coûteux, comme la moisson, sont souvent réalisés par des entreprises spécialisées. Ces services sont assurés par des agriculteurs « doubles actifs », qui cumulent une petite exploitation et un emploi complémentaire, souvent agricole. En 1980, ils représentent 100 % des exploitations de moins de 5 ha, 63 % de celles de moins de 10 ha et 32 % de celles de moins de 25 ha ([Nonn, 1985](#)).

Sur un plan politique, les jeunes agriculteurs s'investissent de moins en moins en politique. Peu à peu, les maires issus du monde agricole sont remplacés par d'autres catégories professionnelles. Cependant, la représentation politique et syndicale agricole reste plus forte dans le Kochersberg que dans d'autres régions ([Nonn, 1985](#))

### ***Déclin de la population agricole, spécialisation en grandes cultures et débuts des effets du changement climatique***

Depuis les années 2000, aucune nouvelle production majeure n'émerge. La plupart des exploitations intègrent une activité céréalière, principale ou complémentaire. Toutefois, les sécheresses de plus en plus fréquentes entraînent une baisse des rendements. L'irrigation reste limitée, car la nappe d'Alsace ne couvre qu'une partie du territoire (Figure 29). La betterave sucrière, auparavant soutenue par la sucrerie d'Erstein et bien intégrée aux rotations, voit sa production chuter après la fin des quotas sucriers de la PAC et la baisse des prix de rachat. Les sécheresses printanières et les restrictions sur les néonicotinoïdes compliquent sa culture, surtout sur sols argileux. Seuls quelques éleveurs la conservent pour l'alimentation du bétail, tandis que les autres se tournent vers le maïs. La production de houblon chute après la rupture des contrats avec la brasserie américaine en 2007, qui absorbait 80 % de la production locale. Le découplage des aides PAC en 2003 pénalise aussi les petites exploitations, qui se tournent alors vers le maraîchage, notamment l'asperge blanche et la vigne, destinées à la vente directe à Strasbourg. Seules les grandes exploitations, capables d'automatiser les cultures spéciales, poursuivent la production de houblon et de tabac. L'élevage devient moins rentable malgré le maintien partiel des aides couplées de la PAC. La hausse des coûts (carburant, fourrage) et la baisse des rendements des prairies et du maïs aggravent la situation. Les abattoirs, autrefois gérés par les coopératives, sont rachetés par de grands groupes spécialisés dans le porc. L'éloignement des autres infrastructures alourdit les frais de transport du bétail. Face à ces difficultés, certains éleveurs développent la vente directe, mais la filière bovine poursuit son déclin.

La population agricole diminue progressivement, facilitant l'agrandissement des grandes exploitations. Entre 2000 et 2010, le nombre d'exploitation baisse de 18 % ([Chambre d'agriculture d'Alsace, 2019](#)). Les petites structures se spécialisent dans des cultures à forte valeur ajoutée, tandis que les grandes exploitations céréalières profitent des aides à l'hectare et stockent leur production pour le marché mondial ou les éleveurs locaux. La taille moyenne des exploitations atteint 39 hectares en 2018, en hausse de 21 % entre 2000 et 2010 ([Chambre](#)

*d'agriculture d'Alsace, 2019*). Deux problématiques agricoles majeures sont observées sur ce territoire : la pénurie de main-d'œuvre, qu'il s'agisse de saisonniers ou de repreneurs ainsi que la transmission des fermes. L'installation reste difficile en raison du prix élevé du foncier et de l'instabilité des marchés agricoles.

Cette évolution marque un changement important pour le territoire où le système de polyculture élevage était majoritaire (*Juillard, 1953*) et se transforme vers une ultra spécialisation des exploitations, largement céréalières. La situation du Kochersberg semble s'inverser : autrefois une région particulièrement riche, du fait de la grande fertilité des sols, elle fait face à de plus en plus de situations de sécheresses sans possibilité d'irriguer, ce qui pourrait appauvrir grandement le territoire et favoriser l'expansion urbaine.

### C. Analyse critique

L'étude du territoire met en lumière les facteurs historiques qui ont influencé le choix des cultures. Si le marché agricole joue aujourd'hui un rôle central, les politiques publiques ont longtemps été déterminantes, comme en témoignent la suppression de la dîme pour les légumineuses ou le monopole d'État sur le tabac. Les infrastructures locales, telles que la sucrerie d'Erstein ou les abattoirs bovins, ont également orienté les productions, tout comme la structuration des filières. Certaines cultures traditionnelles, comme le houblon, se maintiennent malgré des exigences élevées en main-d'œuvre, tandis que d'autres ont dû évoluer sous l'effet des transformations démographiques et de l'exode rural. La diminution de la population agricole active a contraint certaines exploitations à modifier leurs cultures ou à se mécaniser pour compenser la pénurie de main-d'œuvre. Le choix historique de cultures rémunératrices, comme le maïs aujourd'hui, a largement influencé le développement économique de la région et contribué à la prospérité d'une grande partie des agriculteurs. Ces éléments doivent être pris en compte lors des discussions en atelier. Aujourd'hui, la difficulté à trouver des repreneurs accentue ces dynamiques.

L'analyse de ces évolutions locales révèle leur interdépendance avec des tendances globales influençant les choix agricoles. Ces enjeux sont au cœur des discussions menées lors des ateliers, qui interrogent à la fois la désirabilité du métier d'agriculteur et la faisabilité d'une diversification des cultures. De plus, cette étude montre que l'agriculture a déjà su s'adapter à de nombreuses évolutions. Enfin, si une analyse aussi détaillée du passé n'est pas toujours nécessaire pour comprendre l'évolution agricole, elle reste intéressante pour saisir les spécificités locales, identifier les infrastructures disponibles et envisager des scénarios d'avenir adaptés aux réalités du territoire.

## 1.3 Systèmes agricoles et cultures produites aujourd'hui

L'ensemble de ces rappels historiques sur l'évolution de l'agrosystème sont importants pour mieux comprendre les dynamiques actuelles du système dont les éléments de caractérisation sont présentés dans cette partie.

### A. Cadre générique

L'analyse des systèmes agricoles repose sur plusieurs indicateurs qui indiquent les grandes tendances agricoles : nombre d'exploitations et de surfaces agricoles utilisées (SAU), cultures principales, itinéraires techniques, fertilisation.

Ces informations proviennent de diverses sources. Certaines sont nationales et mises à jour régulièrement, comme le Registre Parcellaire Graphique (RPG), qui recense les cultures déclarées à la PAC. D'autres données spécifiques au territoire peuvent être issues d'enquêtes. Il est également possible de s'appuyer sur les plans locaux d'urbanisme ou encore sur des enquêtes financées par les communes ou communauté de communes qui constituent une source précieuse d'information sur l'aménagement du territoire, et par extension sur les zones agricoles. Enfin, des compléments plus précis, notamment sur les pratiques agricoles, peuvent être obtenus par des entretiens avec des conseillers de la chambre d'agriculture ou des acteurs de terrain. Ces données, en partie collectées dans le cadre de programmes d'accompagnement au changement de pratique, tels que Ferti'mieux ou Agr'eau, sont destinées à évaluer les effets des programmes sur les pratiques des agriculteurs au niveau local. Ces programmes visent notamment à améliorer la qualité de l'eau et à encourager des changements de pratiques vers des solutions plus durables.

## B. Application au cas d'étude

Ce territoire reste majoritairement agricole, avec 70 km<sup>2</sup> de SAU. Il compte environ 350 exploitations, principalement dédiée à la production de grandes cultures. Le blé et le maïs occupent 70 % des terres, tandis que 10 % sont dédiées aux betteraves industrielles (Figure 25). L'analyse des RPG génère une meilleure connaissance des rotations existantes sur le territoire. Elles varient selon les parcelles, les plus courantes sont triennales (betterave/blé/maïs) ou biennales (maïs 1 à 5 ans/blé) mais il existe aussi de la monoculture de maïs. Les prairies se situent souvent près des cours d'eau. Malgré des irrégularités ponctuelles, comme en 2012 après un épisode de gel du blé en février, ces proportions restent stables. Les cultures sont valorisées sur le marché agricole (amidonnerie, comptoir agricole, etc) ou destinées à l'affouragement du bétail, bien que cette dernière utilisation diminue.

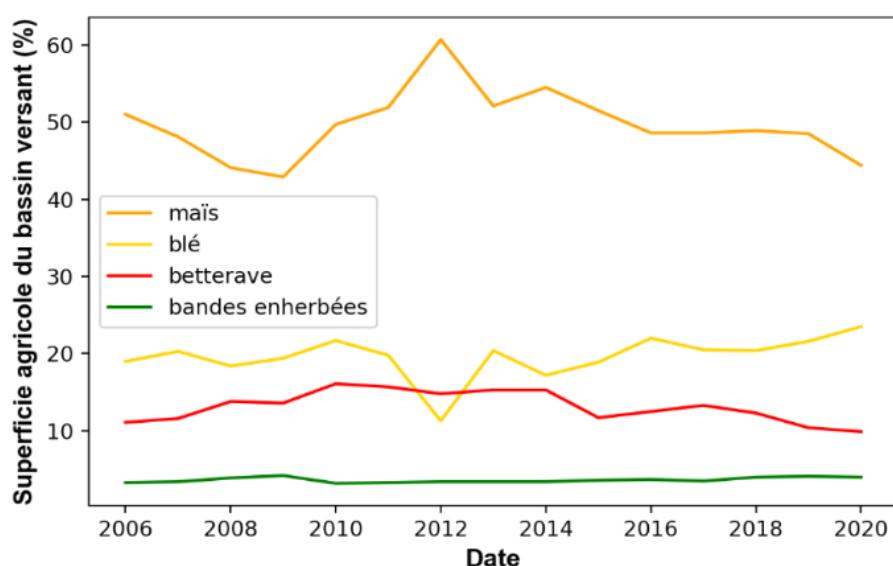


Figure 25. Evolution des surfaces agricoles occupées par les cultures majoritaires du territoire de la Souffel au cours du temps (RPG, 2006-2020)

Certaines variations résultent des fluctuations de prix. Par exemple, la hausse du prix du tournesol est liée à la guerre en Ukraine, ce qui a conduit certains agriculteurs à remplacer le maïs par cette culture (issu d'entretien conduit avec un animateur de terrain). Toutefois, ces ajustements concernent uniquement des cultures ne nécessitant ni nouveaux équipements ni modifications techniques majeures. Le climat influence également les assolements, mais les changements restent mineurs. Les agriculteurs adaptent parfois leurs choix, par exemple en remplaçant le maïs par du blé ou des betteraves, ou en évitant les cultures de printemps durant les années sèches (issu d'entretien conduit avec un animateur de terrain). La culture de betteraves tend à reculer en raison des incertitudes liées à la possible fermeture de la sucrerie d'Erstein et aux contraintes climatiques qui affectent les rendements.

Le changement climatique a des effets délétaires sur les cultures, bien que les rendements restent élevés (Tableau 6). Avant cette évolution, le maïs s'adaptait bien aux conditions locales, marquées par des étés chauds et pluvieux.

L'élevage représente une part marginale de l'activité agricole. La fertilisation repose majoritairement sur des intrants minéraux, même si 25 % des SAU enquêtées utilisent des engrains organiques, essentiellement du fumier de bovins et du lisier de porcs et de bovins (dans 96 % des cas) ([ARAA, 2017](#)). Ces fertilisants sont surtout employés par les éleveurs pour les céréales à paille (67 %) et par les céréaliers en monoculture de maïs (27 %) ([ARAA, 2017](#)). Les amendements organiques sont souvent complétés par des fertilisants minéraux, ce qui peut entraîner un excès d'azote et un risque de lessivage, contribuant à l'eutrophisation ([ARAA, 2017](#)). Les bandes enherbées restent rares malgré leur caractère obligatoire et le classement de la Souffel et de ses affluents en zone de bonne condition agricole et environnementale (BCAE). Les prairies et autres surfaces représentent 4 % du territoire. L'agriculture biologique est peu développée, avec seulement deux exploitations concernées. Même la filière houblon, pourtant très demandée en bio, reste peu engagée dans cette transition. Seule l'activité maraîchère dispose de parcelles en agriculture biologique.

### C. Analyse critique

La compréhension des systèmes agricoles du territoire est essentielle pour établir les données de base nécessaires à la modélisation agronomique. Il est notamment crucial de disposer des couches SIG des parcelles étudiées, des rotations culturales des dernières années (RPG) et des itinéraires techniques associés. Les rendements moyens et optimaux complètent ces informations. Ces données aident à définir des ordres de grandeur pour comparer les résultats de la modélisation agro-hydrologique. Elles servent aussi de support aux discussions avec les différents participants lors des ateliers.

Dans cette thèse, l'hypothèse de frugalité a conduit à ne pas réaliser d'enquêtes de terrain. Cependant, face à la diversité des pratiques, leur recensement reste difficile sans entretiens

*Tableau 6. Rendements moyens en conditions normales et en conditions de sécheresses sur le territoire de la Souffel (Chambre d'agriculture d'Alsace de 2008 à 2020)*

	Conditions « normales »	Conditions « sécheresses »
Maïs	110 (q/ha)	70 à 90 (q/ha)
Blé	85 (q/ha)	65 à 75 (q/ha)
Betterave sucrière	90 (t/ha)	70 à 80 (t/ha)

avec les acteurs locaux, en particulier les agriculteurs et conseillers agricoles. Lorsque de telles enquêtes existent, il est possible de les exploiter et de confronter leurs résultats avec l'expertise locale, comme cela a été fait dans ce travail.

#### 1.4 La pression foncière urbaine en milieu agricole

##### A. Cadre générique

L'étalement urbain au détriment des terres agricoles concerne de nombreux territoires en France. Son étude fait partie intégrante de la caractérisation du territoire, notamment pour analyser les dynamiques de population dans les prospectives locales. L'urbanisation périurbaine modifie l'usage de l'espace, génère des tensions entre habitants et peut entraîner des conflits d'usage.

L'analyse de la pression foncière repose sur plusieurs sources de données. Les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les plans intercommunaux (PLUi), obligatoires et disponibles sur tout le territoire, fournissent un cadre réglementaire. Les statistiques de population de l'INSEE permettent d'identifier les dynamiques démographiques. En cas de forte croissance, il est pertinent d'étudier le profil des habitants en place et des nouveaux arrivants, sous réserve de l'existence d'enquêtes de terrain. Les entretiens avec les habitants constituent une autre approche, riche en informations, mais chronophage.

##### B. Application au cas d'étude

Bien qu'il soit à majorité agricole, l'expansion urbaine a toujours été la principale pression pour les espaces agricoles de ce territoire proche de Strasbourg. La population nouvellement arrivée est principalement composée d'urbains ayant vécu en ville à la recherche d'espaces plus grands qui s'installent dans des maisons individuelles construites sur d'anciennes parcelles agricoles (*Cadène, 1990*). Ces nouveaux arrivants continuent de travailler dans les centres urbains voisins et effectuent donc des navettes quotidiennement. Cette expansion s'accentue avec le temps. Un exemple concret de l'expansion urbaine est visible dans les villages de Pfulgriesheim, Griesheim et Dingsheim, autrefois distincts mais désormais presque fusionnés, la majeure partie des terres agricoles environnantes ayant été convertie en zones pavillonnaires (Figure 26).



Figure 26. Evolution temporelle du territoire villageois de Pfulgriesheim/Griesheim/Dingsheim de 1860 à 2015 – source (PLUi de la CoCoKo) ([Legrand, 2020](#)).

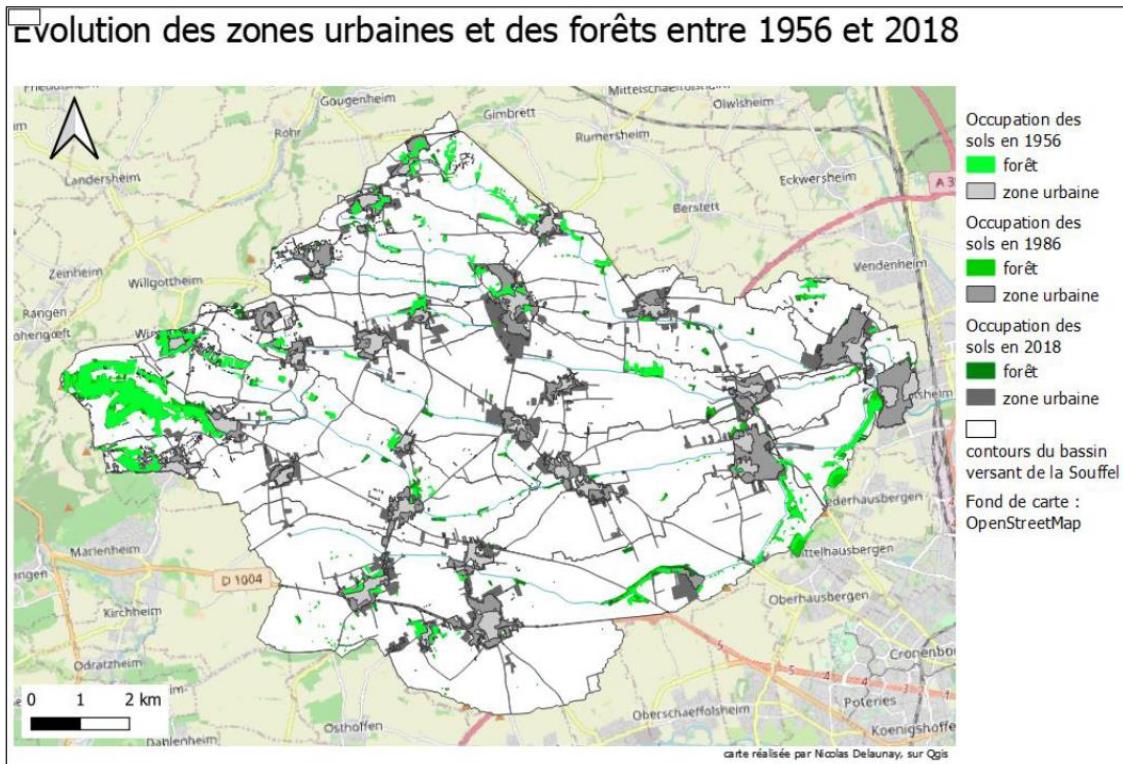


Figure 27. Carte de l'évolution des zones urbaines et des forêts entre 1956 et 2018 (Nicolas Delaunay, stage de M1 en géographie physique encadré en 2021).

Cette dynamique se retrouve sur l'ensemble du territoire (Figure 27) où, entre 1956 et 2018, l'évolution de l'emprise des zones urbaines par rapport à la superficie totale du bassin représentait 2.6 % quand elle représente 12,5 % en 2018. Dans le même temps, la population a plus que doublée, passant de 10 460 en 1968 à 26 648 en 2021 dans le Kochersberg ([Insee, 2024a](#)). L'expansion urbaine s'est particulièrement intensifiée dans les années 1970, lorsque les ceintures des villages, où l'on trouvait encore des légumes plein champ et des arbres fruitiers, ont été supprimées dans le but de construire les premiers lotissements périphériques ([Nonn, 1985](#)). Parallèlement, des infrastructures, comme le Grand Contournement Ouest (GCO), achevé en 2020, ont conduit à un remembrement des terres agricoles.

La population agricole a fortement diminué. Un exemple caractéristique est le village de Truchtersheim, où la population active agricole est passée de 4563 en 1953 à 1299 en 1975 ([Nonn, 1985](#)) puis à 20 en 2021 ([Insee, 2024b](#)). Le prix élevé des terrains constructibles sur le bassin de la Souffel est très attractif par rapport aux terres agricoles (Tableau 7). Cela pousse en partie les agriculteurs en cessation d'activité à vendre leurs terres à des promoteurs immobiliers, ce qui érode d'autant plus le tissu agricole.

Tableau 7. Evolution des prix des terres agricoles et constructibles entre 1968 et 1983 sur le bassin versant de la Souffel ([Nonn, 1985](#))

	Prix des terres agricoles	Prix des terres constructibles
1968	150 francs	1000 francs
1983	700 francs	10 000 francs

## C. Analyse critique

L'essor de la population périurbaine, au détriment de la population agricole, transforme les dynamiques territoriales de la Souffel. Des habitants expriment des plaintes, notamment sur les nuisances olfactives des élevages porcins ([Legrand, 2020](#)) ou l'épandage de pesticides à proximité des habitations. Ces tensions influencent les décisions politiques, comme le refus d'agrandir certaines exploitations porcines.

Souvent regroupés en associations, les résidents exercent une pression politique qui remet en cause les pratiques agricoles et la cohabitation entre nouveaux arrivants et agriculteurs dans un territoire à la fois résidentiel et agricole ([Cadène, 1990](#)). Ces conflits, constituent des signaux faibles en prospective. Leur évolution peut avoir un impact significatif sur l'avenir du territoire et être discutée dans le cadre des ateliers.

## 2. Etat de la ressource en eau

### 2.1 Etat de la ressource en eau

#### A. Cadre générique

Le fonctionnement hydrologique est un moyen de caractériser les rivières. Le régime hydrologique renseigne sur la taille du cours d'eau, son débit et les risques associés (crues, étiages, coulées de boue). L'hydrologie souterraine joue également un rôle clé, une grande partie des réserves en eau étant stockée en sous-sol. Enfin, les usages de la rivière éclairent les potentiels conflits d'usage. L'eau peut servir à l'irrigation, à l'industrie ou à la potabilisation ce qui influence la mise en place de protection adaptées. Le suivi de la qualité des rivières permet d'évaluer leur état et d'identifier l'origine des polluants. Lorsque la rivière est dégradée, l'analyse des concentrations de polluants aide à déterminer leurs sources principales. Le classement de son état constitue aussi un indicateur de l'implication des pouvoirs locaux dans la gestion de la pollution et de l'efficacité des mesures mises en place. La disponibilité des données hydrologiques et qualitatives dépend de l'existence de stations de mesure sur le cours d'eau. En leur absence, d'autres acteurs, tels que les chercheurs, les Agences de l'Eau, la DREAL ou les syndicats de l'eau, peuvent assurer un suivi. Si le cours d'eau est situé en zone à risque (crue, étiage), un bureau d'études peut être mandaté pour collecter ces données et analyser les variations saisonnières. Les informations sur l'hydrologie souterraine, incluant les nappes d'accompagnement et les aquifères, sont disponibles dans des études sur les ressources en eau souterraines, des projets géologiques ou via des organisations spécialisées. Concernant l'irrigation, les prélèvements dans la rivière peuvent être obtenus auprès des DDT et de la police de l'eau. Les projets d'irrigation, quant à eux, sont soit estimés par des bureaux d'études, soit pilotés par les chambres d'agriculture.

#### B. Application au cas d'étude

La Souffel (Figure 28) est une rivière à régime pluvial, sans contribution du massif vosgien. Leur réseau hydrographique présente des aquifères discontinus et peu étendus sur les deux tiers amont. Ce système est particulièrement vulnérable en raison d'un faible débit spécifique moyen de  $0,297 \text{ m}^3/\text{s}$  mesuré à Mundolsheim (AERM, 1971-1990), inférieur à celui des rivières voisines comme la Zorn au nord et la Bruche au sud, et d'une ripisylve peu développée.

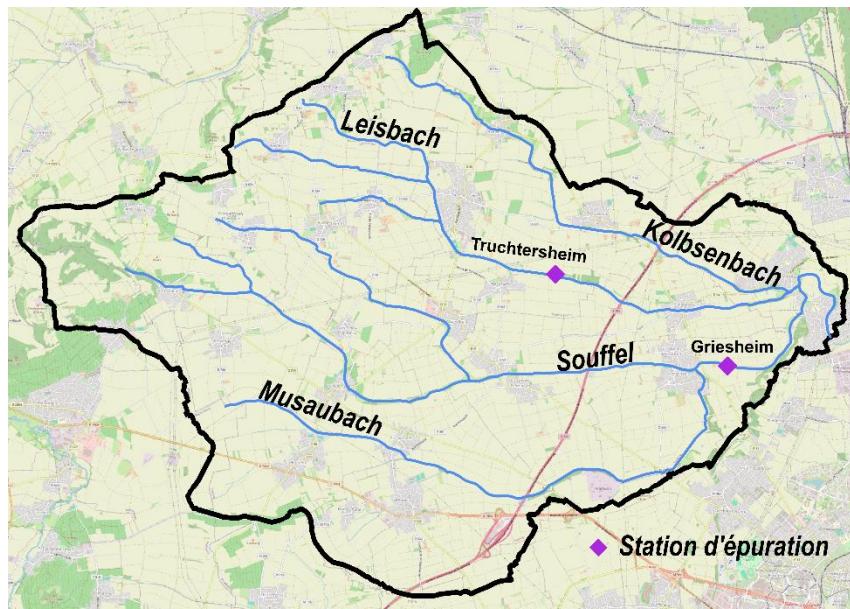


Figure 28. La Souffel et ses affluents, ainsi que les équipements de mesure présents sur le territoire.

Le territoire compte deux stations d'épuration (STEP), situées à Truchtersheim (4 500 EH) et Griesheim (9 500 EH), chacune équipée d'un pluviomètre. La Souffel se distingue par une forte réactivité. Son débit moyen varie considérablement selon les conditions climatiques. En été, à l'exutoire de Mundolsheim, il est principalement maintenu par les rejets des STEP ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)), avec un débit d'étiage de  $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pendant les mois les plus pluvieux, il peut atteindre  $0,410 \text{ m}^3/\text{s}$  (SDEA/DREAL). Sa réactivité entraîne des crues importantes, générant localement coulées de boue et inondations ([Mertz, 2016](#)). La crue décennale actuelle est estimée à  $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (SDEA/DREAL). Toutefois, selon les projections du bureau d'études SOCOS, ces crues pourraient s'intensifier dans les prochaines décennies, avec un débit décennal atteignant  $7,2 \text{ m}^3/\text{s}$  et un débit centennal de  $14,3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

L'irrigation par prélèvement reste marginale sur le territoire, représentant environ 1,5 % de la SAU. Quinze points de prélèvement déclarés sont répartis sur huit exploitations, principalement pour le maraîchage et, dans une moindre mesure, la culture du tabac (DDT). Avec l'aggravation des sécheresses liées au changement climatique, les projets d'irrigation se multiplient pour tenter d'atténuer le stress hydrique. Toutefois, les prélèvements dans la Souffel restent limités en raison de son faible débit. Les prélèvements sont soumis à des autorisations temporaires, conditionnées par le respect du QMNA5<sup>3</sup> ([Arrêté préfectoral, 2022](#)). La nappe d'Alsace, principale ressource en eau potable et agricole de la région, n'est présente que sur le tiers aval du bassin. Sa cote varie entre 136 et 140 m à Lampertheim, avec une hauteur d'eau oscillant entre 10 et 15 m (APRONA) (Figure 29). L'accès à cette ressource est restreint en raison de la profondeur et de la nature argileuse des sols, rendant la création de puits difficile et coûteuse. Un projet d'irrigation est actuellement à l'étude. Il prévoit un réseau linéaire de 60 km, desservant plusieurs communes, alimenté par le pompage de la nappe. Les projets de réutilisation des eaux usées pour l'irrigation ont été abandonnés. En effet, les études ont mis en évidence le coût élevé de la dépollution et la nécessité de maintenir les rejets de la STEP pour soutenir le débit d'étiage ([Lanzi, 2021](#)).

<sup>3</sup> QMNA5 : Valeur du débit mensuel d'étiage atteint par un cours d'eau en moyenne une fois tous les cinq ans.

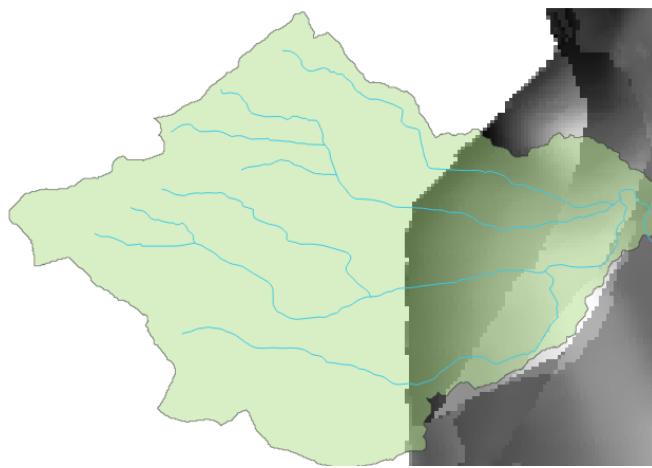


Figure 29. Localisation de la nappe sur le territoire de la Souffel. La profondeur varie de moins de 5 m (clair) à 20 m (foncé). (APRONA).

La Souffel fait l'objet d'un suivi régulier des paramètres quantitatifs et qualitatifs, en particulier dans le cadre des recherches du laboratoire ITES sur les pollutions d'origines agricoles et médicamenteuses. Son état est fortement dégradé : la DCE la classe en mauvais état écologique. Les principaux polluants sont d'origine agricole, notamment les pesticides et nitrates issus du lessivage des sols après épandage.

La Figure 30 détaille l'évolution des concentrations de pesticides en aval de la rivière, avec un code couleur par molécule. La somme des concentrations des molécules mesurées est représentée en ordonnée. Les niveaux varient fortement selon les années, en particulier au printemps lors des périodes de pulvérisation et en fonction des précipitations qui favorisent le ruissellement des substances vers la rivière ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)). Les seuils de potabilité et de potabilisation sont régulièrement dépassés, parfois pour une seule molécule ou en cumulant les concentrations de pesticides. La molécule de S-métolachlore, herbicide largement utilisé sur les grandes cultures comme le maïs et la betterave sucrière est très utilisée sur le bassin. Cette molécule a été interdite depuis 2024.

La Souffel présente également des concentrations élevées de nitrates tout au long de son cours, de l'amont à l'aval (Figure 31). Ces teneurs résultent, comme pour les pesticides, du

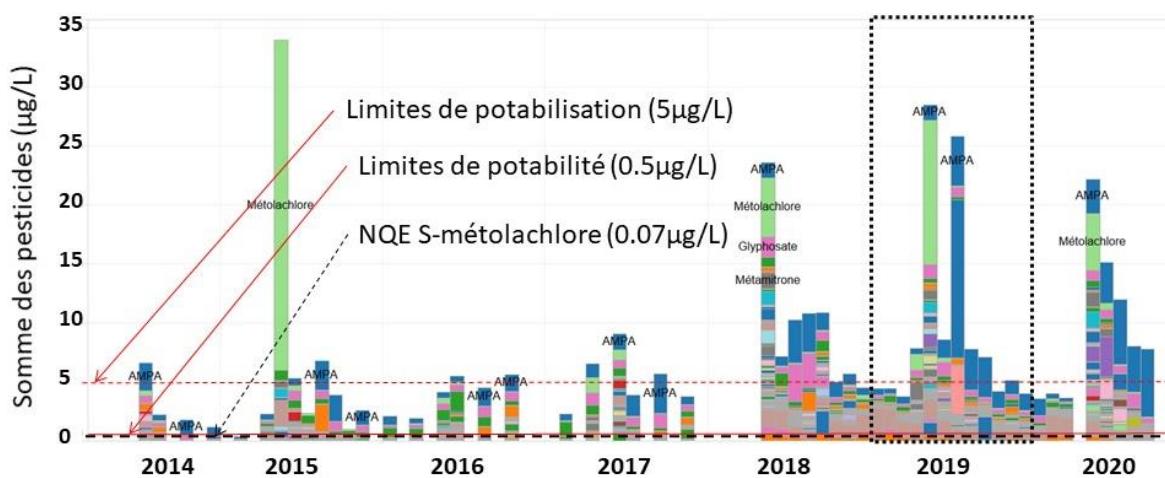


Figure 30. Somme des pesticides quantifiés mensuellement par l'AERM à l'aval de la Souffel, Mundolsheim ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)).

lessivage des sols après des amendements, qu'ils soient organiques ou minéraux. Ce phénomène traduit un excès d'apport azoté, non assimilés par les plantes, révélateur d'épandages trop intensifs et d'une faible capacité de rétention des sols. Les seuils réglementaires sont presque systématiquement dépassés, avec un risque d'eutrophisation des eaux superficielles (seuil à 18 mg/L, pointillé vert sur la figure) et, régulièrement, un franchissement du seuil de potabilité de 50 mg/L.

Ces variations sont fortement influencées par les conditions climatiques : les concentrations les plus élevées sont observées après des périodes de forte pluviométrie, notamment en hiver et au printemps. À l'inverse, les années plus sèches, comme 2019 et 2020, affichent des teneurs moindres, avec un retour à des niveaux élevés en 2021, année particulièrement pluvieuse (Figure 31). On note des concentrations plus fortes en amont des rejets de la station d'épuration de Griesheim qu'à l'exutoire de Mundolsheim, en raison de la forte pression agricole en amont. L'effet de dilution des rejets de station d'épuration contribue à réduire partiellement la concentration en nitrates d'origine domestique ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)). Les autres cours d'eau du Kochersberg présentent des caractéristiques similaires : faibles débits et intensité des activités agricoles et sont donc également polluées ([DREAL, 2015](#)). Néanmoins, ils sont moins étudiés du fait du faible taux d'instrumentation de ces cours d'eau.

### C. Analyse critique

Il existe des diagnostics approfondis divers et en nombre qui portent sur les sols, le lessivage de l'azote et des pesticides, ainsi que le fonctionnement hydrologique, ce qui indique une mobilisation et un outillage important sur le territoire. L'étude de l'état des ressources en eau met en évidence que la majorité des pollutions sur ce territoire sont d'origine agricole. Ainsi, une évolution des pratiques pourrait significativement réduire ces contaminations. Le changement climatique impacte doublement l'agriculture et sa gestion de l'eau. D'une part,

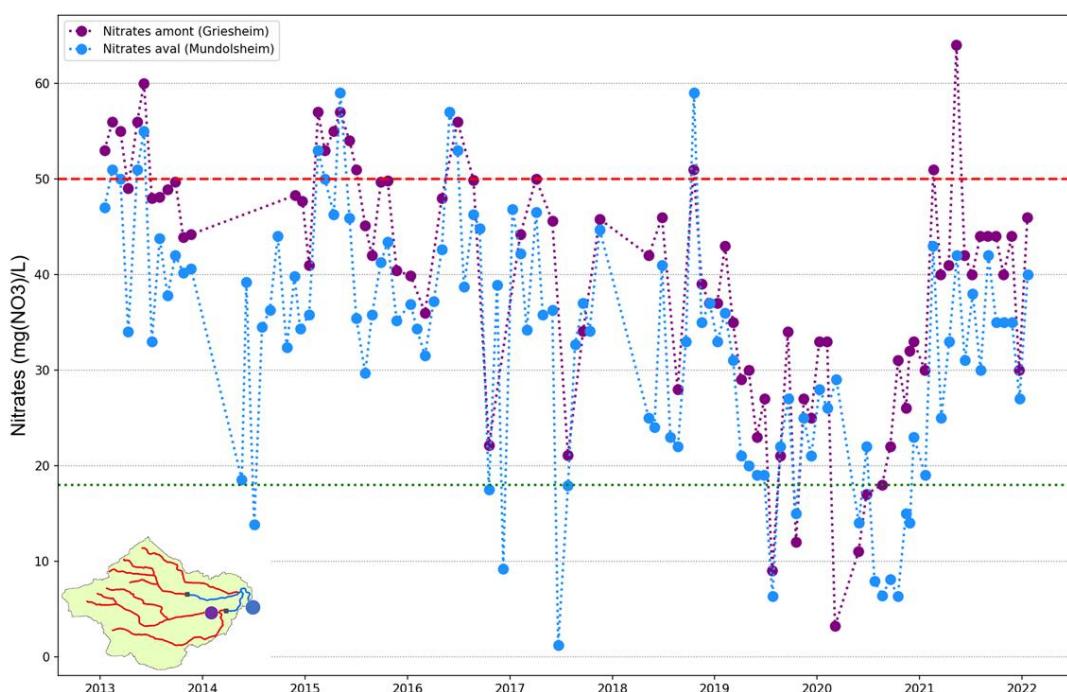


Figure 31. Evolution des concentrations en nitrate à l'amont de la rivière (en violet) et à l'aval (à Mundolsheim) entre 2013 et 2022 (Données de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).

l'augmentation des températures et des sécheresses complique la pérennité de certaines cultures, ce qui se traduit actuellement par des projets d'irrigation en aval du bassin. Toutefois, il pourrait être discuté d'alternatives, au cours des ateliers, comme l'adoption de cultures plus résistantes à la sécheresse et à la chaleur. D'autre part, la hausse de la fréquence et de l'intensité des précipitations, notamment au printemps et en automne, accentue la pollution diffuse ainsi que les risques d'érosion, de coulées de boue et d'inondations. Ce constat ouvre des pistes de réflexion sur la mise en place de couverts végétaux plus systématiques ou le développement de la ripisylve pour stabiliser les berges de la Souffel et limiter l'érosion. Enfin, la diversité et la richesse des études menées sur le territoire témoignent d'une forte mobilisation autour des enjeux hydrologiques et agricoles.

## 2.2 Gestion des usages de l'eau et de la pollution agricole

### A. Cadre générique

La plupart des programmes mis en place au niveau local sont issus de décisions étatiques. Parmi eux, différents dispositifs tels que Ferti'mieux ou Agr'eau visent à accompagner les pratiques agricoles afin d'améliorer la fertilisation et la qualité de l'eau. Ces initiatives sont ensuite encadrées par les institutions locales. La gestion des ressources naturelles sur un territoire reflète sa dynamique ainsi que les principales problématiques environnementales, mais l'implication de certaines entités n'implique pas nécessairement des changements significatifs, par exemple en raison de verrouillages sociotechniques.

Les données exploitables sur cette thématique proviennent principalement des institutions elles-mêmes, via des rapports. Dans certains cas, des équipes de recherche peuvent également avoir produit des études sur le territoire, portant sur des analyses générales ou sur l'application de réglementations particulières. La réalisation d'entretiens avec les animateurs des institutions locales permet d'obtenir une vision globale des mobilisations institutionnelles et sociétales.

### B. Application au cas d'étude

La mobilisation sur le territoire de la Souffel se concentre principalement sur la qualité de la rivière et la renaturation de sa morphologie (Figure 32). Les différents projets, études et opérations menées par les institutions locales depuis le début des années 2000 ont été évoquées lors d'entretiens avec des animateurs de terrain de la chambre d'agriculture et du syndicat de l'eau, qui ont longtemps collaboré sur des missions conjointes entre ces deux institutions.

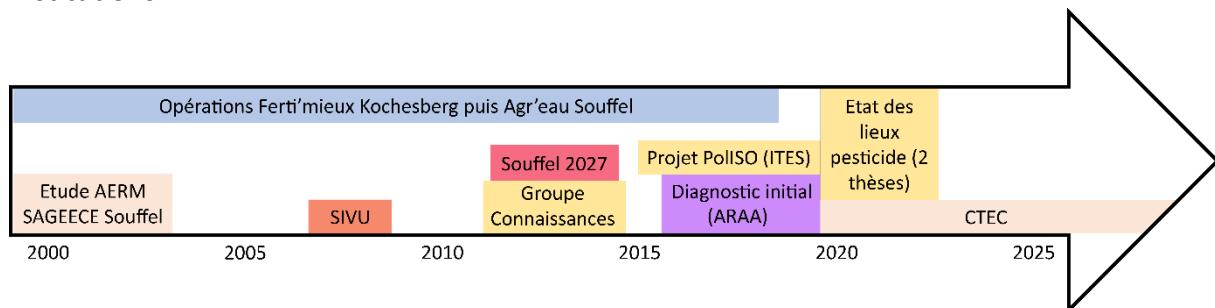


Figure 32. Frise chronologique des études, diagnostics, opérations et projets portés sur le territoire depuis 1999

La DCE, adoptée par le Parlement européen en 2000 a recentré le débat sur la gestion qualitative des rivières. Dans le cadre d'un état des lieux général, l'AERM a réalisé un état des lieux sur le territoire, portant sur l'hydrologie, la qualité de l'eau, les risques d'inondation et la biodiversité. Face aux résultats alarmants, une opération conjointe entre la chambre d'agriculture régionale et le SDEA a été lancée sous le nom de Ferti'mieux Kochersberg qui deviendra Agr'eau Souffel en 2017. Ce programme vise à sensibiliser et accompagner les agriculteurs dans l'adoption de bonnes pratiques agricoles. Son premier objectif était d'optimiser la fertilisation pour limiter les excès d'azote lors des précipitations. Parallèlement, le Conseil du Bas-Rhin a initié en 2000 le Schéma d'Aménagement, de Gestion et d'Entretien Écologique des Cours d'Eau (SAGEECE) du bassin de la Souffel, cofinancé par l'AERM et le département. Contrairement à un SAGE réglementaire, ce dispositif est seulement volontaire. En 2002, l'opération Ferti'mieux Kochersberg a élargi son champ d'action aux pesticides en promouvant des techniques alternatives comme le désherbage mécanique. En parallèle, l'AERM a financé un programme de renaturation des berges et du lit d'un bras de la Souffel près de Truchtersheim afin d'améliorer les écoulements et la ripisylve. En 2008, un syndicat intercommunal à vocation unique (SIVU) a été créé pour faciliter la coopération entre l'ensemble des communes du territoire et mutualiser les ressources, en particulier financières. Ce syndicat a notamment subventionné la création d'un parc écopédagogique le long du Leisbach, un affluent de la Souffel, pour sensibiliser les riverains à l'écosystème de la rivière. En 2011, face à la stagnation des concentrations de pesticides, l'opération Ferti'mieux s'est concentrée sur la diffusion de bonnes pratiques concernant le lavage et le remplissage des pulvérisateurs.

D'autres sujets sont également abordés par les pouvoirs publics, notamment une enquête financée par l'AERM qui a révélé que les riverains connaissent peu l'histoire de la rivière ainsi que les initiatives récentes déployées pour la protéger, ce qui complique la mobilisation locale autour de cette ressource, considérée comme un élément subsidiaire du cadre de vie des riverains ([AERM, 2014](#)). Dès 2014, plusieurs laboratoires de recherche, dont l'Institut Terre Environnement de Strasbourg (ITES), ont étudié les processus de transfert et de dégradation des pesticides dans la Souffel. Ils réalisent alors de nouveaux diagnostics sur le fonctionnement de la rivière. Ces études se concrétisent au travers de thèse sur site ([Droz, 2020](#) ; [Drouin, 2020](#)) et de diagnostic, par exemple sur les effets des pratiques agricoles sur la pollution par les pesticides dans la Souffel ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)). Ce dernier diagnostic propose de réduire de 50 % la surface traitée par pesticides pour atteindre les objectifs de la DCE. Enfin, cette thèse s'insère également dans ce mouvement, afin d'envisager une autre méthode d'initiation au changement de pratique sur le territoire.

En parallèle, les acteurs institutionnels locaux (SIVU, SDEA, AERM, chambre d'agriculture et conseil général du Bas-Rhin) ont lancé le programme Souffel 2027, visant à atteindre le bon état écologique et chimique de la rivière d'ici 2027. Le programme repose sur des mesures volontaires et la poursuite du financement d'études, comme celle de l'ARAA qui a référencé les parcelles les plus à risque quant au transfert de pesticide dans la rivière et met au point un modèle de transfert de pesticide (phyto-TREC, [van Dijk et al., 2017](#) ; [Jonhson, 2020](#)). Cette étude aboutit à réduire le risque d'érosion et de lessivage des intrants, telles que le développement d'une gestion hydraulique douce pour les eaux pluviales, la diversification des cultures avec des CIPAN, et la réduction des sols nus. Le dernier programme envisagé est le

CTEC, regroupant l'ensemble des acteurs locaux et financé par l'AERM qui est institué depuis 2021 et reconduit en 2025.

### C. Analyse critique

Le territoire de la Souffel a bénéficié d'une succession de projets visant à améliorer la qualité de la rivière. Toutefois, les mesures d'accompagnement des agriculteurs, reposant sur le volontariat, concernent souvent les mêmes participants et restent limitées par les contraintes des filières agricoles locales. Malgré un soutien financier important de l'AERM et des collectivités, les initiatives n'ont pas produit d'impact significatif sur l'amélioration de la qualité de l'eau. Ce constat souligne la nécessité d'une approche plus ambitieuse, impliquant des transformations profondes des pratiques agricoles pour garantir une gestion durable des ressources. Le projet Trajectoires s'inscrit dans cette perspective, cherchant à accompagner ces changements de manière plus structurelle.

## 3. Les acteurs du territoire

### 3.1 Acteurs présents sur le territoire

#### ***Choix des acteurs***

##### A. Cadre générique

Un territoire regroupe une grande diversité de parties prenantes, et lorsqu'il s'agit d'un agro-hydrosystème, plusieurs acteurs clés peuvent être identifiés. Parmi eux, les acteurs agricoles jouent un rôle central. Ils représentent l'ensemble de la chaîne de production agricole, depuis les agriculteurs jusqu'aux filières agroalimentaires, en passant par les chambres d'agriculture, les syndicats agricoles et les coopératives. D'autres acteurs également identifiés sont issus des institutions environnementales ou des syndicats. Enfin, les institutions en charge de l'aménagement du territoire et de la gestion des ressources naturelles sont essentielles dans la régulation des usages et la préservation des écosystèmes et sont donc également des acteurs à mobiliser.

L'identification des acteurs stratégiques repose sur plusieurs méthodes. Il est possible de mener des entretiens avec des figures clés du secteur agricole et environnemental, qui peuvent orienter vers des interlocuteurs pertinents en fonction des problématiques abordées. Une autre approche consiste à s'appuyer sur les rapports et études produits par les institutions locales, mais cette méthode donne une vision plus partielle de la diversité des acteurs en présence.

##### B. Application au cas d'étude

#### *Acteurs agricoles présents sur le territoire*

Le territoire étudié est majoritairement agricole et se structure autour des acteurs suivants :

- 350 agriculteurs, dont la majorité sont des céréaliers. Environ 70 % des agriculteurs de la région ont entre 40 et 60 ans (source : Insee).

- La Fédération Départementale des Syndicats d'Exploitants Agricoles (FDSEA), qui est le syndicat agricole dominant sur le territoire. La FDSEA du Bas-Rhin bénéficie d'un ancrage historique fort, étant le syndicat majoritaire depuis les politiques de remembrement à la fin des années 1950. Certains de ses élus sont implantés dans la région de la Souffel, assurant ainsi des relais locaux significatifs.

- La Chambre d'Agriculture d'Alsace, qui fonctionne de manière régionale et décentralisée, avec un relais à Truchtersheim. Elle accompagne les exploitations dans leurs stratégies agronomiques et économiques, en offrant des conseils sur les itinéraires techniques à suivre et peut réaliser des partenariats entre certains agriculteurs (entre céréaliers et éleveurs par exemple). La Chambre réalise également des expertises et enquêtes sur les pratiques agricoles locales. Elle collabore étroitement avec des partenaires tels que le SDEA, les collectivités locales, et d'autres organismes publics comme l'Agence de l'eau, qui finance de nombreux projets. Elle entretient aussi des liens solides avec d'autres acteurs agricoles (syndicats, comptoir agricole...).

- Le Comptoir Agricole, une coopérative agricole créée et gérée par les agriculteurs, qui mutualise les ressources et facilite la vente des produits agricoles. Une grande partie des filières agricoles de la région, notamment les grandes cultures, le houblon, l'élevage et la viticulture, sont gérées par cette coopérative.

- Les grandes industries agroalimentaires, qui sont des acteurs clés du territoire. Elles sont les principaux acheteurs directs, souvent via le comptoir agricole. Par exemple, l'usine internationale Tereos, située à Markolsheim (à environ 50 km), transforme principalement le maïs et le blé en amidon. La sucrerie Erstein illustre aussi l'influence des industries locales sur la production agricole, notamment celle de la betterave sucrière.

- Bio Grand Est, une organisation regroupant les professionnels de l'agriculture biologique, qui emploie des conseillers spécialisés dans les itinéraires techniques adaptés à cette forme d'agriculture dans la région.

#### *Acteurs de la gestion de l'eau et du territoire*

Les institutions en charge de la gestion de l'eau entretiennent des liens étroits avec les acteurs agricoles dont les activités représentent la principale cause de la dégradation des masses d'eau :

- Le SDEA, syndicat local de l'eau, joue un rôle clé dans la dynamique du territoire. Il collabore avec les acteurs locaux (habitants, agriculteurs, filières professionnelles) en établissant des plans d'action partagés. Le territoire de la Souffel est l'un des axes prioritaires de son intervention. Sa mission principale sur cette rivière est d'améliorer sa fonctionnalité hydromorphologique. Par exemple, des travaux de reméandrage ont été réalisés sur une partie de la rivière pour restaurer son tracé naturel. Le SDEA conduit également des études spécifiques pour approfondir les connaissances hydrologiques et hydrogéologiques du territoire, notamment sur les échanges entre nappes phréatiques et rivières, ainsi que sur les transferts de contaminants. En parallèle, le SDEA gère la production d'eau potable, provenant de la nappe d'Alsace, et l'assainissement via deux stations d'épuration situées à Griesheim et

Truchtersheim. De plus, il utilise de plus en plus des outils fonciers pour améliorer la qualité de l'eau de la Souffel, notamment en reméandrant la rivière et en réservant les parcelles riveraines à des bandes enherbées. Le syndicat est également à l'origine du développement de filières durables dans la région, comme la culture de la sylphie ou du chanvre pour la production de matériaux biosourcés.

- L'AERM intervient principalement comme financeur, que ce soit directement via le SDEA ou par le biais de projets menés avec d'autres acteurs, comme la Chambre d'Agriculture. Elle a également mis en place un réseau de surveillance sur le territoire, tant sur les aspects qualitatifs que quantitatifs. Ses compétences couvrent diverses dimensions des ressources en eau : l'eau potable, le suivi de l'état des milieux aquatiques et la biodiversité dans les rivières.
- Les collectivités locales (SIVU, CocoKo, et l'Eurométropole de Strasbourg) s'efforcent de mettre en œuvre des plans visant à restaurer la qualité de l'eau de la Souffel.

### ***Relation entre ces acteurs sur le territoire***

Les entretiens menés sur le terrain ont mis en évidence des tensions persistantes entre certains acteurs. Le territoire reste fortement syndiqué, notamment autour de la FDSEA, et des pressions existent pour maintenir cette tradition syndicale dans la région. Il existe des tensions avec le peu d'agriculteurs engagés dans une pratique de l'agriculture biologique, qui peuvent se concrétiser par des difficultés d'accès au foncier, certains acteurs conventionnels bloquant l'achat de terres.

Par ailleurs, des frictions croissantes se manifestent entre les riverains - qui s'organisent dans des associations de quartier - et les agriculteurs, particulièrement autour de la pratique d'épandage de pesticides ou les nuisances olfactives liées à l'élevage (comme les odeurs provenant des porcheries). En retour, les agriculteurs perçoivent ces critiques comme une remise en cause de leur activité professionnelle. Toutefois, ces conflits ne semblent pas suffire à provoquer un changement significatif de pratiques agricoles. De même, les relations avec les associations environnementales sont souvent conflictuelles. Enfin, la Chambre d'agriculture se montre parfois difficile à mobiliser pour des études visant à modifier les pratiques agricoles, un phénomène accentué par la fin des financements directs de l'AERM, qui l'oblige désormais à contractualiser ses interventions. La fin des financements directs de la Chambre d'agriculture fait suite à une absence de résultat sur le long terme concernant l'amélioration de la Souffel.

### **C. Analyse critique**

Le territoire bénéficie d'un réseau d'acteurs bien structuré, qui se connaît déjà et collabore dans le cadre de nombreux projets. Ce dynamisme local est un atout majeur, notamment grâce à la présence d'animateurs de terrain qui entretiennent des liens directs avec les agriculteurs et connaissent les enjeux environnementaux. Cependant, malgré ces collaborations, certaines tensions persistent, en particulier sur les questions agricoles et environnementales. Ces divergences influencent la mise en œuvre de stratégies de gestion durable et doivent être prises en compte dans la composition des panels participant aux ateliers. Cette décision de différencier les panels lors des premiers ateliers a été en partie motivée par ce facteur. Les fortes tensions sur le territoire nous ont également conduits à ne

pas solliciter les membres des associations environnementales, par crainte que la participation des agriculteurs aux ateliers en soit compromise.

### 3.2 Mobilisation des participants

#### A. Cadre générique

L'identification des acteurs clés produit une certaine assurance quant à une représentation équilibrée des enjeux locaux dans les ateliers participatifs. Le contact des participants peut se faire de différentes manières.

Pour les agriculteurs :

- 1) Demander des listes lors des entretiens aux différents représentants des institutions locales afin d'identifier les agriculteurs intéressés par des projets de changement de pratique.
- 2) Contacter les représentants syndicaux des agriculteurs ou les membres des coopératives qui pourront à leur tour fournir une liste de participants potentiels. C'est cette option que nous avons retenue. Toutefois, elle introduit un biais, car la plupart des participants sont idéologiquement affiliés à ce syndicat.
- 3) Se rendre directement sur le terrain pour échanger avec les agriculteurs. Cependant, cette démarche est plus complexe sans intermédiaire pour faciliter l'introduction et exige un investissement temporel conséquent.

Pour les animateurs et administratifs des institutions :

- 1) Identifier les animateurs de terrain en s'appuyant sur les rapports d'étude publiés et les organigrammes institutionnels. Cette approche reste toutefois incomplète, car certains animateurs ne publient pas d'études et certains organigrammes sont difficilement accessibles.
- 2) Mener des entretiens avec des acteurs clés, qui pourront orienter vers d'autres participants pertinents.

#### B. Application au cas d'étude

##### *Panel agriculteur*

La constitution de ce panel vise à mieux comprendre les réalités du terrain, les difficultés et les craintes des agriculteurs. Il a été constitué par le biais d'un élu de la FDSEA. Nous l'avons contacté dans un premier temps afin de savoir s'il était intéressé par ce projet. La thématique du changement climatique étant une thématique d'intérêt, y compris pour la FDSEA. Suite à une réunion, il a proposé de constituer ce panel en sollicitant d'autres agriculteurs membres du syndicat. Cette approche a permis d'accéder à un large réseau d'agriculteurs mais également d'introduire un biais à l'étude du fait des positions idéologiques particulières liées à l'appartenance systématique à ce syndicat. Malgré cette homogénéité apparente, les participants font face à des contraintes économiques importantes, nuançant leur positionnement. Les agriculteurs du panel sont principalement des exploitants de structures moyennes (30-40 ha) pratiquant la polyculture-élevage, notamment l'élevage bovin laitier et viande ou l'élevage avicole couplé à des cultures céréalières. Certains sont également spécialisés dans la culture de fruits et d'asperges. Ils sont directement touchés par le manque d'eau et l'aggravation de la sécheresse. Lors du troisième atelier, organisé en partenariat avec

le SDEA et l'AERM, d'autres agriculteurs ont été intégrés, notamment ceux ayant participé aux opérations Agri'Kochersberg et Agr'eau Souffel.

Il existe toutefois un biais inhérent à la constitution de ce panel. Les agriculteurs présents lors des premiers ateliers, notamment l'atelier de constitution d'images, partagent majoritairement les idées promues par la FDSEA, comme la réduction des contraintes environnementales et l'agrandissement des parcelles pour améliorer la productivité. Cependant, passer par la FDSEA était indispensable pour toucher un large réseau d'agriculteurs. Il a été difficile d'élargir ce panel pour le rendre plus représentatif de l'ensemble des exploitations agricoles mais les participants sont souvent confrontés à de véritables contraintes, principalement économiques. Il ne s'agit donc pas uniquement de grandes exploitations capitalistiques, mais plutôt de structures moyennes à grandes, qui tendent à disparaître.

#### *Panel animateur*

Le panel animateur est plus hétérogène que celui des agriculteurs. Le principal critère de sélection a été la connaissance du terrain. Il regroupe des animateurs en contact direct avec la population agricole, soit par des activités de conseil en agriculture conventionnelle ou biologique, soit par des études sur des questions agronomiques, environnementales ou climatiques produites sur le territoire. Ce panel comprend également des animateurs spécialisés dans la gestion de l'eau, notamment ceux du SDEA et d'autres gestionnaires concernés par la qualité de l'eau, comme l'EMS. Des élus locaux, en particulier des agriculteurs impliqués dans les questions agro-environnementales, ont aussi été sollicités. Des institutions comme Bio Grand Est ont été invitées afin d'apporter une vision alternative à celle de l'agriculture conventionnelle. L'objectif est de réunir diverses institutions et élus pour réfléchir collectivement aux évolutions nécessaires pour des pratiques plus durables. Des représentants du Comptoir Agricole ont également été sollicités, mais n'ont pas répondu, ce qui entraîne une sous-représentation des filières agroalimentaires dans ce panel. Cette absence a été remarquée par plusieurs participants, qui ont souligné l'importance d'impliquer ces acteurs pour initier des changements concrets, notamment en faveur de l'agriculture biologique ou raisonnée.

#### *Participation aux ateliers*

Ces panels ont chacun participé aux ateliers du projet. Le Tableau 8 détaille la participation par atelier. Les conditions météorologiques expliquent l'absence d'agriculteurs au deuxième atelier. La prévision de pluie les a contraints à anticiper leurs travaux agricoles. De plus, aucun agriculteur présent lors des deux premiers ateliers n'a participé au troisième, organisé un an et demi plus tard. Ce délai a probablement contribué à leur absence. En revanche, d'autres agriculteurs ayant participé aux opérations Agr'eau Souffel ont rejoint cet atelier. À l'inverse, les animateurs ont montré une plus grande assiduité, notamment au deuxième et troisième atelier. Toutefois, le roulement des représentants institutionnels a entraîné une certaine variabilité dans les participants d'une année à l'autre.

### C. Analyse critique

*Tableau 8. Participation par panel et par atelier*

	Atelier 1	Atelier 2	Dont déjà venus	Atelier 3	Dont déjà venus
Panel agriculteur	8	3	2		
Panel animateur	9	10	7	18	6

Le panel agriculteur a été le plus difficile à mobiliser. Plusieurs raisons expliquent cette difficulté : les agriculteurs sont régulièrement sollicités par différentes institutions pour des projets divers, et leur disponibilité varie en fonction des saisons et des conditions climatiques. Un manque important a été relevé dans la participation des autres maillons de la chaîne de production-alimentation, au-delà des conseillers agricoles. L'absence des représentants des filières agroalimentaires a constitué un réel manque dans les discussions, car la majorité des problématiques agricoles sont directement liées aux dynamiques des filières. Il est donc crucial d'intégrer ces acteurs dans les futurs ateliers pour enrichir les échanges et envisager des transformations réalistes et applicables aussi par les acteurs privés. À l'inverse, le panel animateur a été plus facile à mobiliser. Leur participation s'inscrit dans leur temps de travail, et la question climatique est devenue une priorité au sein des institutions en France. Si les ateliers ont permis de mieux comprendre les enjeux locaux et d'ouvrir un dialogue constructif, la diversité des participants reste perfectible pour assurer une représentativité équilibrée et maximiser les effets des réflexions engagées.

## Conclusion

Ce chapitre cherche à répondre à plusieurs questions de recherche. La première porte sur l'intérêt de l'étude des spécificités territoriales dans le cadre de cette méthode. Au fil du développement de ce chapitre, il semble essentiel de s'intéresser à différents aspects du territoire. La connaissance de ces spécificités est d'abord nécessaire en tant que données d'entrée pour les modèles agro-hydrologiques. Ensuite, certaines de ces connaissances sont primordiales pour dialoguer avec les acteurs locaux, car elles servent à poser un cadre structuré pour les discussions lors des ateliers. Enfin, une bonne appréhension du territoire permet de déterminer quelles parties prenantes y sont présentes et oriente le choix des participants aux ateliers.

La seconde question concerne l'approche frugale de la méthode. Le degré de détail nécessaire pour une bonne compréhension du territoire est difficile à déterminer précisément. Certains éléments de base, notamment pour la modélisation et le choix des acteurs, sont indispensables et ne peuvent être substitués. D'autres informations, comme le diagnostic agraire ou la pression foncière, aident à mieux comprendre l'histoire du territoire et facilitent les échanges avec les acteurs locaux en offrant une vision globale. Ces éléments peuvent également servir à identifier des leviers potentiels lors des ateliers, en particulier pour l'exercice de la prospective. Toutefois, il est possible de suivre cette méthodologie sans approfondir ces domaines, car ces investigations sont très chronophages. L'enjeu réside donc dans la recherche d'un équilibre entre gain de temps et connaissance minimale du territoire.

## Références

- AERM. (2014). Etude de type sociologique auprès d'un panel d'habitants du bassin versant de la Souffel.
- Anderson, R., Bayer, P. E., & Edwards, D. (2020). Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current opinion in plant biology*, 56, 197-202.
- ARAA .(2005). Apports de matières organiques et rôle dans la fertilisation des terres agricoles en Alsace. Rapport.
- ARAA .(2017). Evaluation des modifications des pratiques de gestion de l'azote des agriculteurs agr'eau Kochersberg. Rapport.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2013). *SWAT 2012 input/output documentation*. Texas Water Resources Institute.
- Arrêté préfectoral. (2022). Portant autorisation temporaire de prélèvement d'eau dans les cours d'eau du Bas-Rhin pour l'exercice de l'activité saisonnière d'irrigation.
- Blennow, K., Persson, J., Tome, M., & Hanewinkel, M. (2012). Climate change: believing and seeing implies adapting. *PloS one*, 7(11), e50182.
- Cadène, P. (1990). L'usage des espaces péri-urbains: Une géographie régionale des conflits. *Études rurales*, 235-267.
- Catt, J. A. (2001). The agricultural importance of loess. *Earth-Science Reviews*, 54(1-3), 213-229.
- Chambre d'agriculture d'Alsace. (2019). Communauté de commune du Kochersberg.
- DREAL Alsace. (2014). Risques naturels et hydrauliques : les coulées d'eau boueuse.
- DREAL Alsace (2015). Atlas des paysages d'Alsace.
- Drouin, G. (2020). Micropollutant dissipation at the sediment-water interface by coupling modelling and Compound-Specific Isotope Analysis
- Droz, B. (2020). Pesticides dissipation at the sediment-water interface: insight from compound-specific isotope analysis (CSIA)
- Godard, A. (1967). La culture du maïs-grain en Alsace et en Bade du Sud: réactif du milieu naturel ou du milieu socio-économique?. *Revue géographique de l'Est*, 7(1), 3-172.
- Insee a. (2024). Dossier complet intercommunalité-métropole du Kochersberg.
- Insee b. (2024). Dossier complet Commune de Truchtersheim (67495).
- Islam, S. M. F., & Karim, Z. (2019). World's demand for food and water: The consequences of climate change. *Desalination-challenges and opportunities*, 2019.
- Jonhson, M. (2020). Modélisation des transferts des produits phytosanitaires par ruissellement dans le bassin versant d'Alteckendorf (67) : Validation et évaluation du modèle Phyto-TREC.
- Juillard, E. (1953). La vie rurale dans la plaine de Basse-Alsace: essai de géographie sociale.
- Juillard, E. (1959). Etudes rurales: des économistes aux géographes. In *Annales. Histoire, Sciences Sociales* (Vol. 14, No. 4, pp. 766-776). Cambridge University Press.
- Kapp, E., & Schäfer, R. (1965). La culture du chanvre dans la plaine Rhénane : importance économique et rôle de cette fibre textile dans la vie rurale de l'Alsace de jadis. *Arts et Traditions Populaires*, 35-52.
- Lanzi, B. (2021). Étude de faisabilité de ressources alternatives pour l'irrigation sur le territoire Centre-Nord du SDEA.
- Lefrancq, M., Van Dijk, P., Jetten, V., Schwob, M., & Payraudeau, S. (2017). Improving runoff prediction using agronomical information in a cropped, loess covered catchment. *Hydrological Processes*, 31(6), 1408-1423.
- Legrand, M. (2020). Diagnostic agraire du Kochersberg, région agricole aux portes de Strasbourg. Mémoire de fin d'études, AgroParitech.
- Lerch, D., Pariset, J.D., Boehler, J.M. & Livret, G. (1983). Histoire de l'Alsace rurale. Librairie ISTRA. Strasbourg/Paris (Grandes Publications, XXIV).

Mertz, C. (2016). Coulées de boue de Wasselonne et Romanswiller du 7 juin 2016. Rapport ATMO-RISK.

Nagargade, M., Tyagi, V., & Kumar, M. (2017). Climate smart agriculture: an option for changing climatic situation. *Plant Engineering by Snježana Jurić, IntechOpen*, 143-165.

Nonn, H. (1985). II.—Etudes récentes de géographie sur le Kochersberg. *Revue Géographique de l'Est*, 25(4), 405-412.

Payraudeau, S., Imfeld, G. (2021). Bassin versant de la Souffel : Fonctionnement hydrologique, transport & devenir des pesticides - saison culturelle 2019. Projet PolISO.

Rathay, S. Y., Allen, D. M., & Kirste, D. (2018). Response of a fractured bedrock aquifer to recharge from heavy rainfall events. *Journal of Hydrology*, 561, 1048-1062.

Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: a literature review. *Biological conservation*, 141(10), 2417-2431.

Ritz-Bruppacher, J. (1981). Manières d'être paysan en Alsace. *Revue des Sciences Sociales*, 10(1), 54-64.

Sadok, W., Wiersma, J. J., Steffenson, B. J., Snapp, S. S., & Smith, K. P. (2022). Improving winter barley adaptation to freezing and heat stresses in the US Midwest: bottlenecks and opportunities. *Field Crops Research*, 286, 108635.

Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.

Shokati, B., & Ahangar, A. G. (2014). Effect of conservation tillage on soil fertility factors: a review.

Soubeyroux, J. M., Dubuisson, B., Josse, P., Régimbeau, M., Ribes, A., & Sorel, M. (2023). Changement climatique et extrêmes récents dans l'est de la France.

van Dijk, P., Sauter, J., Koller, R., & Auzet, A. V. (2009). Cartographie de la sensibilité à l'érosion des sols et du risque potentiel de coulées d'eaux boueuses en Alsace. Actes des 10èmes Journées d'Etude des Sols, 11, 369-370.

van Dijk, P., Venturini, V., Koller, R., & Bockstaller, C. (2017). Cartographie des zones sources de pollution diffuse des eaux de surface par ruissellement des pesticides. 47e congrès du Groupe Français des Pesticides (à Nancy).

Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R. J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M. & Rockström, J. (2022). A planetary boundary for green water. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(6), 380-392.

Zeyl, R. (1930). La culture du houblon en Alsace. In *Annales de Géographie* (Vol. 39, No. 222, pp. 569-578). Armand Colin.



## Chapitre 3 : Produire un diagnostic partagé sur la question climatique

Ce chapitre aborde la question du changement climatique selon deux axes complémentaires. Le premier concerne la capacité des modèles climatiques à produire des données exploitables à l'échelle locale. Le second s'intéresse à la manière dont ces données sont perçues, comprises et discutées par les acteurs du territoire, à travers l'analyse des retours issus du premier atelier participatif organisé sur le bassin de la Souffel.

La production de projections climatiques localisées permet d'esquisser des futurs climatiques plausibles à l'échelle du bassin versant étudié. Toutefois, ces projections soulèvent des limites méthodologiques, bien documentées dans la littérature ([Quintana-Seguí et al., 2017](#) ; [Boé et al., 2020](#)), notamment concernant la représentation des événements extrêmes à fine échelle spatiale ([Chervenkov & Slavov, 2021](#) ; [Robin et al., 2023](#)). Ces limites sont d'autant plus importantes que les données climatiques générées constituent des variables d'entrée essentielles pour les modèles agro-hydrologiques. Ces derniers sont mobilisés pour simuler les effets du changement climatique sur les variations quantitatives et qualitatives des masses d'eau ([Coppus & Imeson, 2002](#) ; [Ledger & Milner, 2014](#)) et sur les conditions de croissance des cultures ([Knox et al., 2016](#)). Il est donc crucial que les ordres de grandeur des variables climatiques (température, précipitation) soient correctement représentés afin d'assurer la plausibilité des images modélisées. Ces modèles climatiques de référence sont utilisés dans de nombreuses études prospectives climatiques hydrologiques et agronomiques à plusieurs échelles : internationales ([IPCC, 2023](#)), nationales, comme Explore 2 ([Robin et al., 2023](#)), régionales ou à l'échelle d'un grand bassin versant ([Rivière et al., 2021](#) ; [Sauquet et al., 2019](#) ; [Pérez-Cutillas et al., 2020](#)). Néanmoins, leur application à des territoires de petite taille (quelques dizaines à centaines de km<sup>2</sup>) reste encore marginale. Ce chapitre s'inscrit dans cette perspective, en testant la pertinence de leur usage à l'échelle locale.

Trois questions de recherche guident cette réflexion :

- Les données climatiques à l'échelle locale reproduisent-elles correctement les tendances ?
- Le changement climatique constitue-t-il un levier mobilisateur pour les acteurs locaux, notamment dans la profession agricole ?
- Les changements de pratiques mis en œuvre dans une logique d'adaptation au changement climatique contribuent-ils à une gestion plus durable des ressources, et en particulier des ressources en eau ?

La légitimité des données climatiques est également interrogée à travers leur confrontation aux perceptions des acteurs locaux. Il s'agit d'évaluer dans quelle mesure les projections présentées sont jugées crédibles et capables de susciter un engagement suffisant pour ouvrir un débat sur l'évolution des pratiques. En effet, l'adhésion à la démarche participative repose en partie sur l'hypothèse que le changement climatique est considéré comme un enjeu pertinent par les acteurs locaux du monde agricole et environnemental ([Blennow et al., 2012](#)). Par extension, les effets du changement climatique incitent à réfléchir collectivement aux changements de pratique qu'il est possible d'établir face aux transformations imposées ([Smith, 2017](#)). Ces effets sont déjà ressentis par ceux qui sont directement exposés aux

variations climatiques, comme c'est le cas pour les agriculteurs et les gestionnaires de l'eau, même dans des zones tempérées ([von Gehren et al., 2023](#)), où les changements climatiques sont déjà perceptibles ([IPCC, 2023 ; Iglesias et al., 2012](#)). C'est pour cela que nous souhaitons produire un diagnostic partagé entre les différents participants et les porteurs de cette étude concernant les tendances climatiques probables qui apparaîtront à moyen-long terme sur le territoire. Ce diagnostic partagé est une analyse collective visant à construire un consensus sur la question climatique avec les différentes parties prenantes.

Ce chapitre comporte deux parties. La première porte sur la production de données climatiques à l'échelle locale : elle présente les sources mobilisées, la structuration des jeux de données, les méthodes d'analyse, les résultats obtenus, ainsi que les précautions à prendre pour leur utilisation dans le cadre d'une modélisation à l'échelle locale. La seconde est consacrée au premier atelier participatif, conçu pour établir un diagnostic partagé sur les effets du changement climatique. Elle expose le cadre conceptuel, la méthodologie suivie et les résultats des échanges, avec un double objectif : évaluer la réception des données climatiques par les acteurs et explorer leurs perceptions des effets du changement climatique sur leurs pratiques. Conformément à la logique du chapitre précédent, l'organisation interne est déclinée en plusieurs sous-sections. Une première section présente les enjeux génériques, formulés de manière à être transposables à d'autres territoires. La seconde décrit en détail la méthodologie de recherche mise en œuvre dans le cadre de ce travail. La troisième expose l'application concrète sur le territoire de la Souffel. Enfin, une dernière section vient conclure l'ensemble du chapitre en articulant les résultats produits avec les hypothèses de recherche et les apports théoriques.

## 1. Produire une projection climatique à l'échelle locale

Lorsqu'il s'agit de mobiliser les acteurs locaux autour des enjeux climatiques, il semble essentiel de s'interroger sur les données climatiques à disposition ainsi qu'à leur degré de réalisme. Cette section explore les conditions de production de telles projections, en posant comme hypothèse la capacité des modèles climatiques à représenter fidèlement les tendances passées (1959–2005) et actuelles (2006-2021), afin de justifier leur utilisation dans les simulations des futurs co-construits avec les acteurs locaux. La comparaison entre données climatiques observées et données modélisées soulève plusieurs enjeux. Elle interroge d'abord la pertinence même de cette comparaison, bien qu'il s'agisse ici principalement d'une évaluation des tendances générales. Elle soulève ensuite la question du choix des variables utilisées pour établir cette comparaison.

Pour produire une image climatique locale passée, présente et future, les sorties de modèles climatiques globaux ou continentaux sont mobilisées et ajustées par des méthodes de descente d'échelle. Celles-ci permettent de passer d'une résolution spatiale large (plus de 100 km<sup>2</sup>) à une maille plus fine de 64 km<sup>2</sup> (correspondant à une grille de 8 × 8 km utilisée par Météo-France), améliorant la disponibilité locale des données. Néanmoins, ces méthodes de descente d'échelle présentent des défis scientifiques car il est complexe d'intégrer, représenter ou distinguer tous les phénomènes climatiques locaux à partir de modélisation à plus grande échelle. Dans ce cadre, j'ai choisi de comparer les données simulées sur les périodes passées et présentes, à l'échelle de la maille de 64 km<sup>2</sup>, aux données climatiques observées au sol (MétéoFrance) sur les mêmes emplacements (Figure 35), afin d'évaluer la cohérence

des tendances. Cette étape vise à renforcer la crédibilité des résultats auprès des acteurs locaux en ancrant les projections dans le contexte territorial réel, condition que l'on suppose indispensable à une mobilisation éclairée autour du changement climatique.

La structure de cette section se déploie en quatre temps : (i) la présentation des données mobilisées ; (ii) la description des méthodologies suivies pour établir la comparaison des tendances des données simulées et observées ainsi que la production d'une projection climatique future ; (iii) l'analyse des résultats obtenus pour le territoire de la Souffel et (iv) la conclusion répondant aux questions et sous-questions de recherche posées au début de cette partie.

### 1.1 Présentation générale des données

Cette section présente les différentes données utilisées, en détaillant leur nature, leur description, leur disponibilité, ainsi que les incertitudes qui peuvent leur être associées.

#### *Présentation des données*

Les données météorologiques et climatiques utilisées dans cette étude sont présentées dans le Tableau 9.

*Tableau 9. Présentation des données climatiques et météorologiques disponibles à l'échelle locale.*

Producteur et nature	Présentation	Disponibilité
<b>MétéoFrance</b> <u>Variables :</u> température, humidité de l'air, vitesse du vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire.	Données mesurées en stations météorologiques, effectuée à 1,5 m du sol dans un abri par différents capteurs en fonction de la variable mesurée température, vitesse du vent, humidité... Les précipitations sont mesurées par des pluviomètres (données journalières) ou des pluviographes (données à 6 minutes).	Mis à disposition sur data.gouv.fr
<b>MétéoFrance (SAFRAN)</b> <u>Variables :</u> température, humidité de l'air, vitesse du vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire.	Observations interpolées (maillage 64 km <sup>2</sup> ) pour fournir des estimations spatialisées des variables météorologiques : température, précipitation, vitesse du vent, humidité relative, nébulosité et rayonnements solaires sur l'ensemble du territoire ( <i>Durand et al., 1993 ; Habets et al, 2008</i> ). SAFRAN estime chaque paramètre à différents niveaux d'altitude, tout en intégrant les données observées des zones voisines. Les données simulées sont d'abord contrôlées grâce à une méthode itérative comparant les observations au sol avec les données interpolées ( <i>Quintana et al., 2008</i> ). Les analyses de température, humidité, vent et nébulosité sont réalisées toutes les 6 heures à l'aide des observations disponibles et de modèles prévisionnels comme Arpège ( <i>Soubeyroux et al, 2008</i> ).	Mis à disposition sur data.gouv.fr
<b>MétéoFrance (Antilopes)</b>	Lames d'eau produites par analyse des images radars selon une résolution de 0,8km <sup>2</sup> (0,01 x 0,01 degré décimal,	Générées uniquement

<u>Variables :</u> lames d'eau	longitude et latitude) qui sont générées au pas de temps de cinq minutes ( <a href="#">Laurantin, 2008</a> ). Les lames d'eau intègrent également les données des stations au sol quand elles sont disponibles pour caler les images radars. Ces données pluviométriques ont l'avantage d'être spatialisées car issues d'images radars mais l'incertitude réside sur la question de l'intensité des pluies.	pour les services de l'Etat, acquises dans ce travail via une collaboration avec la DREAL
<b>EURO-CORDEX</b>  Couples de modèles climatiques (globaux/régionaux)	Les modèles climatiques globaux (CMIP5) représentent les interactions globales à l'échelle de la planète entre l'atmosphère, les océans et les surfaces continentales. La résolution spatiale des modèles globaux est très grossière, et les mailles sont de l'ordre de la centaine de km. Les modèles régionaux disponibles sur le portail du DRIAS sont issus du programme de recherche européen EURO-CORDEX ( <a href="#">Jacob et al., 2014</a> ). Ils permettent une prise en compte des phénomènes météorologiques locaux, en diminuant la surface des mailles étudiées (à une dizaine de km <sup>2</sup> ) sous haute résolution spatiale, avec des représentations topographiques plus précises ( <a href="#">Gutiérrez et al., 2019</a> ). Les projections de ces couples de modèles donnent les variables météorologiques à un pas de temps journalier. Elles sont disponibles sur le territoire de la France métropolitaine à une résolution de 64 km <sup>2</sup> , interpolées sur la maille SAFRAN. Pour chacun des 12 modèles proposés, les données climatiques journalières sont disponibles sur une période de référence (1950-2006) sur laquelle chaque modèle a été calé et une période de projection climatique (2006-2100). Chaque couple de modèle couvre des scénarios d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre, des « representative concentration pathways » (RCP), correspondant à une limite moyenne de forçage radiatif à la surface de la terre en 2100 de 2,6 ; 4,5 ou 8,5 W.m <sup>-2</sup> .	Mis à disposition sur la plateforme DRIAS
<b>Explore 2</b>  Couples de modèles climatiques (globaux/régionaux)	Explore 2 est un projet qui vise à développer les connaissances sur les effets du changement climatique sur la ressource en eau ( <a href="#">Robin et al., 2023</a> ). Ce projet comporte un volet climatique dont les premiers travaux ont porté sur l'étude des modèles climatiques. Les études sur les modèles EURO-CORDEX ont montré plusieurs limites, notamment une augmentation systématique des précipitations en Europe pour les RCP les plus grands. Les nouveaux couples de modèles climatiques visent à montrer plus de variabilité parmi les climats futurs et à améliorer la représentation des événements pluvieux extrêmes, notamment en utilisant principalement les modèles régionaux qui prennent en compte les aérosols ( <a href="#">Marson et al., 2024</a> ).	Mis à disposition sur la plateforme DRIAS

Concernant les modèles climatiques, il convient de préciser la différence entre le projet EURO-CORDEX et le projet Explore 2. Si l'étude a d'abord été amorcée à partir des douze modèles climatiques d'EURO-CORDEX, nous avons finalement privilégié ceux issus du projet Explore 2, disponibles depuis 2024. Ces derniers présentent une variabilité climatique plus marquée, offrant ainsi une meilleure représentativité des incertitudes liées aux projections climatiques. En effet, les chercheurs de l'INRAE et l'OFB, à l'origine du projet Explore 2, ont développé deux nouveaux narratifs climatiques (cf. infra) en combinant des modèles climatiques globaux et régionaux issus de la base élargie EURO-CORDEX. Quatre narratifs, déclinés pour chaque RCP, sont donc proposés : deux d'entre eux s'appuient sur des configurations déjà présentes dans EURO-CORDEX : le couple de modèle correspondant au narratif *Narcisse*, celui associé au narratif *Aster*. Les deux autres narratifs reposent sur de nouvelles combinaisons entre modèles globaux et régionaux, conçues pour élargir le champ des futurs climatiques explorés. Ces nouveaux narratifs visent à représenter une plus grande diversité de trajectoires, en mettant l'accent sur des variations contrastées : d'un côté, un scénario de fort réchauffement accompagné d'un assèchement marqué et de l'autre, un futur plus humide avec des précipitations accrues. Ensemble, ces quatre narratifs, construits à l'échelle de la France, offrent des visions divergentes et complémentaires des évolutions climatiques possibles (Figure 33, [Marson et al., 2024](#)) :

- ***Narcisse* « Changements futurs relativement peu marqués ».** Les températures augmentent sur l'ensemble des saisons de manière modérée par rapport aux autres narratifs et les précipitations moyennes augmentent de l'ordre de 6 % sur le territoire, notamment avec une augmentation de la pluviométrie hivernale dans le quart nord-est, comprenant une augmentation d'occurrence d'événements pluvieux intenses à ce même endroit. L'ETP est tout de même affecté par l'augmentation de la température (+ 28 %) et le bilan hydrique sur la France est de l'ordre de -150 %.
- ***Aster* « Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations ».** Ce narratif décrit le plus fort réchauffement toutes saisons confondues couplé à une diminution drastique des précipitations en été et à leur augmentation en hiver, notamment dans le quart nord-est, avec des événements intenses localisés dans le nord de la France. L'ETP augmente de l'ordre de 25 % et on assiste à une augmentation du déficit hydrique de 230 % sur l'ensemble du territoire.
- ***Euphorbe* « Réchauffement marqué et augmentation des précipitations ».** Ce narratif décrit des contrastes saisonniers marqués entre l'hiver et l'été à l'échelle nationale en termes de température et un assèchement modéré en été dû à une augmentation importante des précipitations (+ 25%). Le réchauffement global marqué entraîne une augmentation de l'ETP et une diminution du bilan hydrique d'environ 160%.
- ***Dahlia* « Fort réchauffement et fort assèchement en été ».** Ce narratif décrit un des plus forts réchauffements en été à l'échelle nationale, couplé à une diminution de l'ordre de 10 % des précipitations, qui subsistent dans le quart nord-est. On assiste donc à un assèchement important en été et à une augmentation significative de l'ETP (+ 43 %) et à la diminution drastique du bilan hydrique, de l'ordre de 400 %.

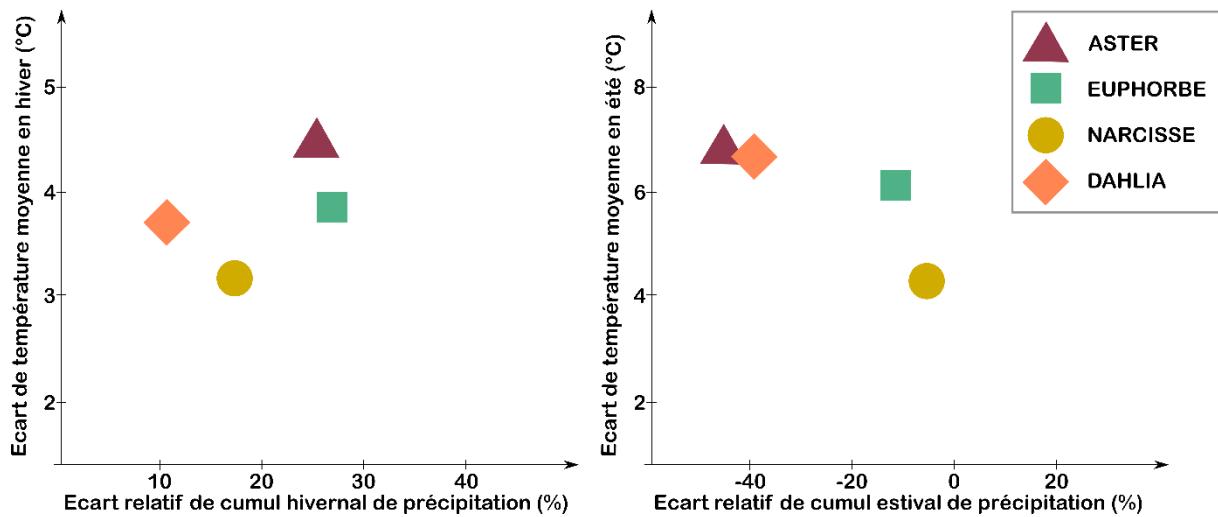


Figure 33. Identification des narratifs Explore 2 (scénarios RCP 8.5) par représentation des écarts de précipitation et de température à la fin du siècle par rapport à la période 1976-2005 sur l'ensemble du territoire Français (Marson et al., 2024).

Ces quatre narratifs semblent refléter de manière satisfaisante une diversité de futurs climatiques à l'échelle du territoire français. Ils seront donc utilisés comme base pour la modélisation des futurs co-construits avec les participants aux ateliers. Toutefois, il est important de souligner que cette variabilité peut fluctuer à des échelles plus locales.

#### *Incertitudes liées aux modèles climatiques*

Les sorties des modèles climatiques sont soumises à plusieurs sources d'incertitude, qui influencent directement la fiabilité des projections. Ces incertitudes peuvent être regroupées en plusieurs catégories :

- Les incertitudes réflexives et stochastiques, en particulier concernant les hypothèses d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols dont dépendent les scénario RCP ([Hawkins & Sutton, 2011](#)). Ces hypothèses traduisent des trajectoires socio-économiques futures incertaines en particulier en ce qui concerne l'intégration de choix politiques, technologiques et comportementaux.

- Les incertitudes épistémiques, qui proviennent soit d'une connaissance partielle des phénomènes scientifiques, soit d'une implémentation incorrecte des hypothèses dans les modèles. Elles constituent une limite importante car elles induisent des incertitudes dans les variables climatiques de sorties. Par exemple, le scénario 8.5 a tendance à sous-estimer systématiquement les effets du changement climatique ([Boé et al., 2020](#)). Dans les données EURO-CORDEX, ces incertitudes sont particulièrement marquées pour les précipitations, dont les fluctuations sont bien plus importantes que pour d'autres variables ([Herrera et al., 2020](#)).

Parmi les hypothèses scientifiques les plus sources d'incertitude, on peut citer :

- L'absence de prise en compte des rétroactions de la végétation face à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique ([Schwingenschägl et al., 2019](#)).

- Une surestimation de l'évaporation au-dessus des mers, notamment les mers fermées, combinée à une sous-estimation au-dessus des terres, influençant directement la variabilité des précipitations ([Boé et al., 2020](#)).
- Une prise en compte non systématique, selon les modèles, des rétroactions liées à la concentration des aérosols dans l'atmosphère, alors que cette variable impacte non seulement les flux solaires, mais aussi l'évapotranspiration et, par conséquent, les précipitations via l'humidité atmosphérique ([Gutiérrez et al., 2019](#) ; [Boé et al., 2020](#)).
- Les incertitudes induites par la descente d'échelle lors de la régionalisation des modèles climatiques globaux. Chaque étape de ce processus introduit des hypothèses spécifiques qui se cumulent à chaque couche et génèrent une cascade d'incertitudes, ce qui affecte la robustesse des projections à l'échelle locale (Figure 34). Plus précisément, par exemple, les modèles régionaux simulent des températures un peu plus basses que les modèles climatiques globaux car les hypothèses de départ représentent différemment la chimie atmosphérique, notamment les processus liés aux aérosols et aux nuages ([Jacob et al., 2020](#) ; [Boé et al., 2020](#)). De plus, la topographie et l'usage des sols sont souvent mal représentés dans les modèles globaux, ce qui a pour effet un manque d'intégration des réponses du système en fonction de l'usage des sols (i.e. étalement urbain, déforestation, changement de pratiques agricoles) et qui a également des effets importants qui se répercute lors du couplage entre les modèles globaux et régionaux.

De plus, les modèles climatiques présentent des biais systématiques (erreurs sur les moyennes, minimisation des extrêmes), corrigés lors de la descente d'échelle par des méthodes statistiques. Dans ce travail, la méthode ADAMONT, appliquée aux modèles du programme EURO-CORDEX, a été utilisée dans le but de minimiser ces biais. Cependant, cette correction peut elle-même introduire des erreurs, en particulier pour les événements extrêmes, qui tendent à être sous-estimés ([Herrera et al., 2020](#)).

The cascade of uncertainties generated

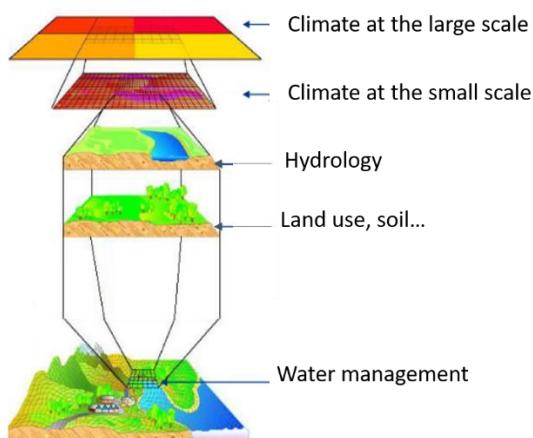


Figure 34. Cascade des incertitudes en modélisation climatique liée à la descente d'échelle, produite par Eric Sauquet.

## 1.2 Approche méthodologique adoptée

La question de recherche initiale, centrée sur les données climatiques, porte sur le réalisme des tendances simulées par les modèles climatiques en comparaison avec les observations passées. Cette validation s'appuie sur les données disponibles à l'échelle de la maille. Si l'évaluation temporelle, conduite sur plusieurs décennies, est bien assurée, l'analyse spatiale, en revanche, reste limitée à une seule maille. Cela s'explique par le fait que la modélisation agro-hydrologique utilisée ne considère qu'une maille unique, centrée sur le territoire de la Souffel. Ce choix méthodologique, introduit un biais important en ne mobilisant pas les tendances spatiales qui est justifié par le cadre ultra-local de l'étude d'un territoire d'une centaine de km<sup>2</sup>. En effet, la modélisation des futurs agro-hydrologiques est réalisée à l'échelle d'une seule maille, ce qui impose de comparer les tendances temporelles sur une base spatiale identique.

Nous postulons que la qualité des prédictions passées constitue une condition nécessaire à l'acceptabilité des projections par les acteurs locaux. Dès lors, la robustesse des données climatiques est appréhendée ici à travers l'évaluation de la représentativité des données interpolées SAFRAN (température et précipitations) et des données simulées issues des modèles climatiques d'EURO-CORDEX, en les comparant aux observations au sol au niveau des stations météorologiques de MétéoFrance.

### *Méthodologie suivie*

#### 1) Comparaison des tendances observées et simulées

La première étape méthodologique consiste à comparer les tendances issues des données SAFRAN et des observations MétéoFrance sur la période 1959–2021, pour les variables de température et de précipitation. Cette comparaison est pertinente, car les modèles climatiques sont corrigés localement à l'aide des données SAFRAN via la méthode ADAMONT ([Verfaillie et al., 2017](#)). Les indicateurs analysés sont les moyennes et médianes annuelles et mensuelles, calculées à partir des séries journalières. Ces statistiques permettent d'identifier à la fois les tendances générales à long terme et les écarts saisonniers. La robustesse de la représentation des précipitations est particulièrement cruciale dans le cadre de la modélisation agro-hydrologique. Les précipitations influencent directement la disponibilité en eau dans les sols, la croissance des cultures ([Constantin et al., 2015](#)), mais aussi les processus de ruissellement et de lessivage, essentiels à la modélisation des flux de nitrates, de pesticides, ou encore des risques de coulées de boue et de crues ([Malagó et al., 2017](#)). Toutefois, le modèle SAFRAN présente des limites, notamment dans la représentation des événements pluvieux de forte intensité ([Quintana et al., 2008](#)), en raison de la nature très localisée de certains épisodes qui dégradent les interpolations spatiales ([Le Moigne, 2002](#)). La température joue également un rôle central dans la modélisation des processus agro-environnementaux, qu'il s'agisse de la croissance des cultures, du cycle de l'azote, ou de la dégradation des pesticides ([Constantin et al., 2015](#)).

La correction des biais et la descente d'échelle spatiale des modèles climatiques EURO-CORDEX sont réalisées à l'aide de la méthode ADAMONT. Cette méthode statistique combine une correction des biais avec une désagrégation temporelle permettant de produire des séries horaires cohérentes à partir de sorties journalières. Le calibrage repose sur les réanalyses

SAFRAN, utilisées comme référence observationnelle, ce qui garantit une homogénéité spatiale et temporelle des variables météorologiques corrigées, sur la grille SAFRAN. Cela justifie l'intérêt de comparer les données les modèles climatiques et les données SAFRAN.

## 2) Evaluation de la capacité des modèles à reproduire des précipitations intenses

La représentation des événements extrêmes constitue l'une des principales limites des modèles climatiques et météorologiques, en particulier en ce qui concerne les précipitations associées à des périodes de retour élevées (*Chervenkov & Slavov, 2021*). Pourtant, la caractérisation de ces événements est essentielle en modélisation agro-hydrologique, car ils ont des effets directs sur plusieurs composantes du système : la croissance des cultures (*Sippel & Otto, 2014*), l'érosion des sols, le transport de contaminants (*Coppus & Imeson, 2002*), ou encore le comportement hydrologique des cours d'eau (*Ledger & Milner, 2014*). Dans ce contexte, la méthode ADAMONT (*Verfaillie et al., 2017*) vise à corriger les principaux biais des modèles climatiques, notamment ceux liés à l'intensité des précipitations extrêmes et à la fréquence des jours pluvieux (*Ouzeau et al., 2014*). Bien que cette méthode n'élimine pas entièrement les incertitudes associées aux événements extrêmes, elle permet néanmoins de garantir une distribution plus homogène des variables météorologiques, y compris en conditions saisonnières contrastées.

Une première approche consiste à comparer les intensités extrêmes de précipitations simulées SAFRAN et observées MétéoFrance. Deux types de comparaisons sont réalisés :

1. Cumul des précipitations en fonction de l'intensité des jours de pluie (par classes d'intensité),
2. Comparaison directe des intensités journalières année par année.

Ces comparaisons permettent d'évaluer la fidélité de SAFRAN à reproduire les intensités de pluie mesurées localement. Elles sont essentielles pour estimer le réalisme des simulations, notamment dans le cadre de leur utilisation en modélisation agro-hydrologique.

Une seconde méthode repose sur l'utilisation de la loi de Gumbel (*Gumbel, 1935*), issue de la théorie des valeurs extrêmes. Cette loi permet de modéliser les maxima annuels ou saisonniers, souvent sous-estimés par les lois statistiques classiques. Elle est appliquée ici pour évaluer la sensibilité des modèles climatiques (EURO-CORDEX), ainsi que des données SAFRAN, à la représentation des précipitations extrêmes.

Les valeurs maximales de précipitations sont extraits des séries temporelles observées (stations Météo-France) et simulées (SAFRAN, EURO-CORDEX), sur différentes périodes temporelles pour analyser leur croissance en fonction du nombre d'observations et de leur distribution propre. Pour chaque période, la moyenne ( $\bar{X}$ ) et l'écart-type ( $\sigma$ ) des maxima observés et modélisés sont calculés. On suppose ensuite que les valeurs maximales annuelles suivent une loi de Gumbel, ce qui permet d'analyser la distribution extrême des événements et leur représentativité dans les différents jeux de données.

### 1.3 Application au cas d'étude de la Souffel

#### *Localisation des mailles et des stations*

Les différentes mailles et stations utilisées sont représentées sur la Figure 35. Les données à disposition sont les suivantes :

- Données historiques issues de stations météorologiques locales :

Station d'Entzheim (1958-2022, située à 13 km au sud du bassin versant de la Souffel) : précipitations, températures (moyenne, minimale et maximale), évapotranspiration réelle et potentielle, avec un pas de temps journalier. Station de Brumath (1975-2022, située à 4 km au nord-est du bassin) : précipitations à pas de temps journalier.

- Données interpolées SAFRAN (Météo-France) :

Données journalières observées et interpolées sur un maillage de 64 km<sup>2</sup> par le modèle SAFRAN (données disponibles gratuitement depuis le 1er janvier 2024). Les périodes étudiées correspondent à celles des données observées, afin de permettre une comparaison directe.

- Données simulées issues de modèles climatiques :

Données journalières simulées par des modèles climatiques régionaux et globaux (1950-2100), disponibles sur le même maillage de 64 km<sup>2</sup>. Deux périodes sont distinguées : 1950-2005 : calage des modèles, 2006-2100 : validation et déclinaison selon différents scénarios climatiques RCP.

## 1) Comparaison des tendances observées et simulées

### *Résultats obtenus sur les précipitations*

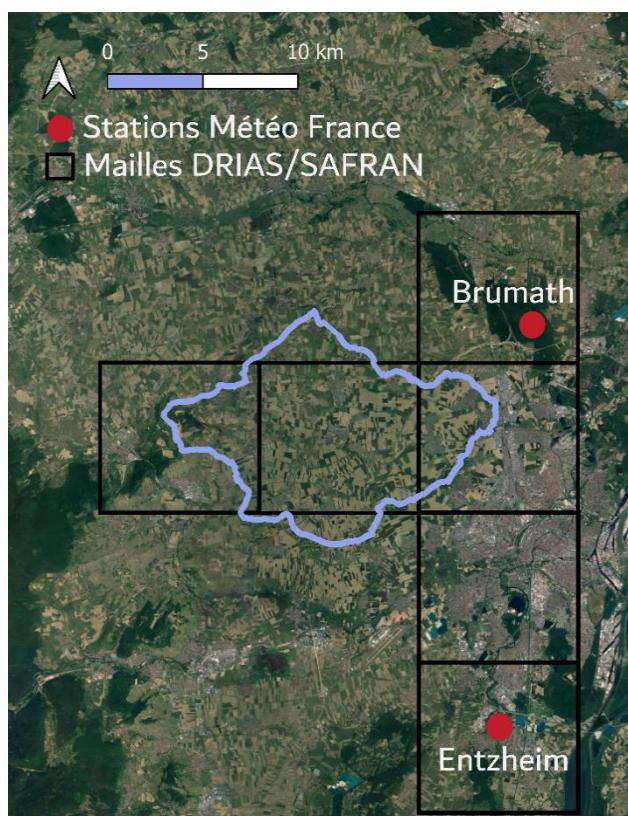


Figure 35. Localisation du bassin versant de la Souffel, des mailles DRIAS/SAFRAN qui y sont disponibles et des stations météo les plus proches

Les graphiques obtenus (Figure 36) montrent que le cumul des précipitations issu du modèle SAFRAN est presque toujours supérieur sur les 62 années étudiées à Entzheim (à gauche), avec des écarts pouvant atteindre 200 mm en 1965 et 2010. C'est également le cas pour Brumath (à droite). Cependant, les tendances et les variations interannuelles importantes sont généralement bien reproduites par SAFRAN. Concernant l'analyse des moyennes mensuelles, SAFRAN surestime les précipitations entre septembre et mars, mais sous-estime de mai à juillet pour Entzheim. Pour les deux sites, les écarts sont plus marqués lorsque SAFRAN surestime les précipitations (écart médian de 8,9 mm) que lorsqu'il les sous-estime (écart médian de 3,1 mm). Certains mois sont correctement simulés en fonction des sites, notamment au printemps et en automne, ce qui montre tout de même la capacité de ce modèle à simuler correctement les événements pluvieux ([Quintana-Seguí et al., 2017](#)).

La correction des modèles climatiques basée sur les réanalyses SAFRAN donne des résultats hétérogènes en ce qui concerne la variable précipitation. La Figure 37 illustre la diversité des tendances entre les modèles EURO-CORDEX et les données SAFRAN sur une même maille. Globalement, la majorité des modèles reproduisent correctement les tendances saisonnières observées : une augmentation des précipitations entre avril et juillet, avec un pic marqué en juin, ainsi que des hivers plus secs. Cependant, certains modèles, notamment les trois derniers présentés, présentent des écarts significatifs, avec une sous-estimation marquée des précipitations. Leurs valeurs se situent nettement en dessous de celles mesurées par les stations MétéoFrance (Figure 37).

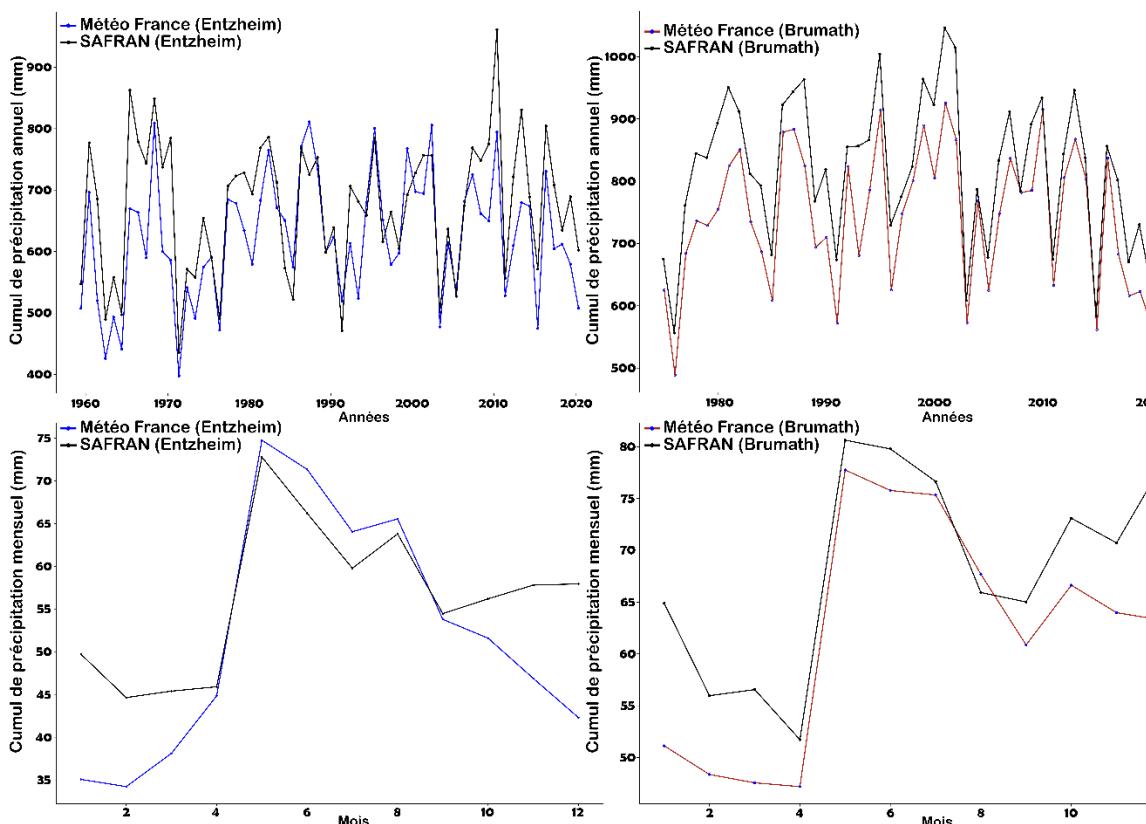


Figure 36. Évolution des précipitations moyennes annuelles et mensuelles des données Météo France et SAFRAN à Entzheim (1959-2021, à gauche) et à Brumath (1975-2021, à droite).

Pour la période 2006–2021, il est possible de distinguer les scénarios climatiques selon les RCP (Annexe 1). Bien que les modèles reproduisent de manière cohérente certaines tendances générales, une sous-estimation persistante des précipitations observées demeure, quel que soit le scénario. De plus, d'importantes disparités apparaissent entre les modèles climatiques, non seulement dans leur capacité à reproduire les tendances locales, mais également dans la manière dont ces écarts évoluent par rapport à la période de référence 1959–2005. Ces différences ne semblent pas corrélées à un RCP spécifique, aucun scénario ne se démarquant clairement par une meilleure concordance avec les observations ou les données SAFRAN. Néanmoins, en dépit de ces écarts ponctuels, les cumuls annuels simulés par la majorité des modèles EURO-CORDEX restent globalement du même ordre de grandeur que ceux fournis par SAFRAN, ce qui confirme une certaine cohérence sur les totaux annuels, bien que des biais saisonniers subsistent.

### *Résultats obtenus sur les températures*

Sur la maille correspondant à Entzheim, les températures simulées par SAFRAN présentent une excellente concordance avec les données mesurées par la station météorologique locale. Sur la période 1958–2021, l'écart relatif entre les deux séries est extrêmement faible, de l'ordre de 0,006 %.

Comme précédemment, les tendances issues des données au sol au niveau des stations météorologiques et de la maille SAFRAN la plus proche peuvent être comparées (Figure 38).

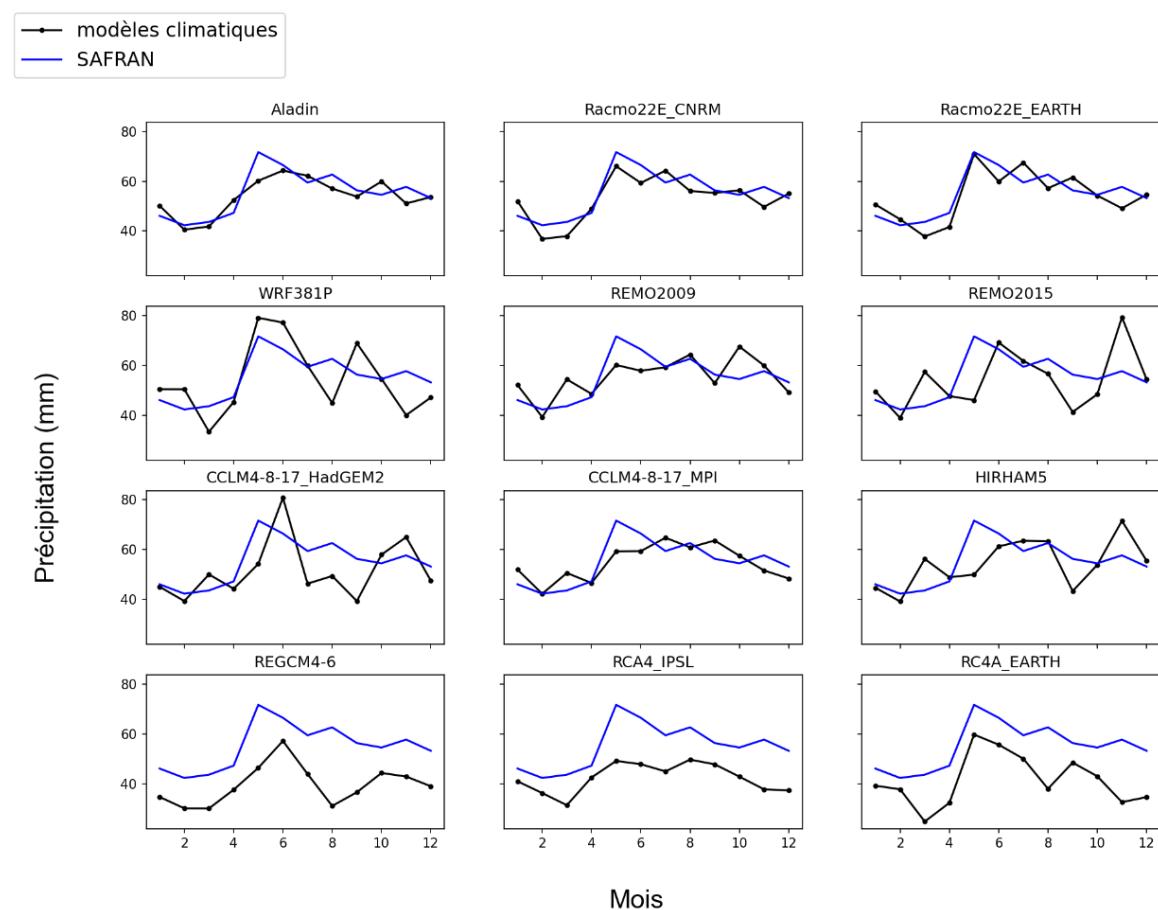
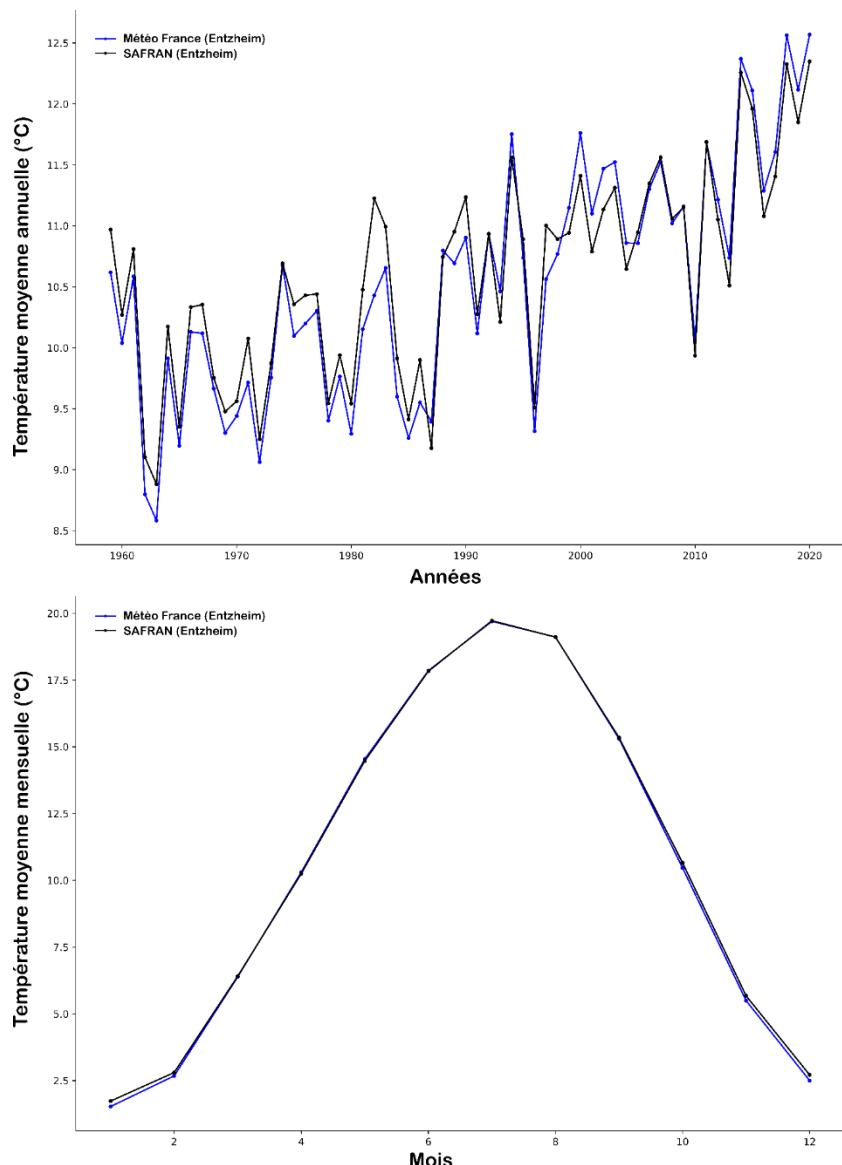


Figure 37. Précipitation moyenne cumulée mensuelle de SAFRAN (bleu) et des modèles climatiques (noir) sur la maille SAFRAN/Météo France d'Entzheim sur la période 1959-2005.

On observe que les moyennes des deux séries sont très proches et que la variabilité intra-annuelle est remarquablement bien reproduite par SAFRAN. L'analyse des séries temporelles permet de mettre en évidence les tendances à long terme. Jusqu'au début des années 1990, SAFRAN tendait à surestimer légèrement les températures ; à partir de cette période, un meilleur ajustement est observé, avec une tendance possible à la sous-estimation des températures mesurées par la station (Figure 38). Les moyennes mensuelles simulées par SAFRAN sont également très proches des observations, ce qui confirme les résultats obtenus à l'échelle nationale ([Quintana-Seguí et al., 2008](#)). Par ailleurs, les tendances de température à long terme sont également bien capturées par les modèles climatiques corrigés, aussi bien en comparaison avec les données SAFRAN qu'avec les observations de MétéoFrance (Annexe 2).

## 2) Evaluation de la capacité des modèles à reproduire des précipitations intenses



*Figure 38. Evolution des températures moyennes annuelles (à gauche) et mensuelles (à droite) calculées à partir des données journalières de la station météo Entzheim et sur celles de la maille SAFRAN sur la période*

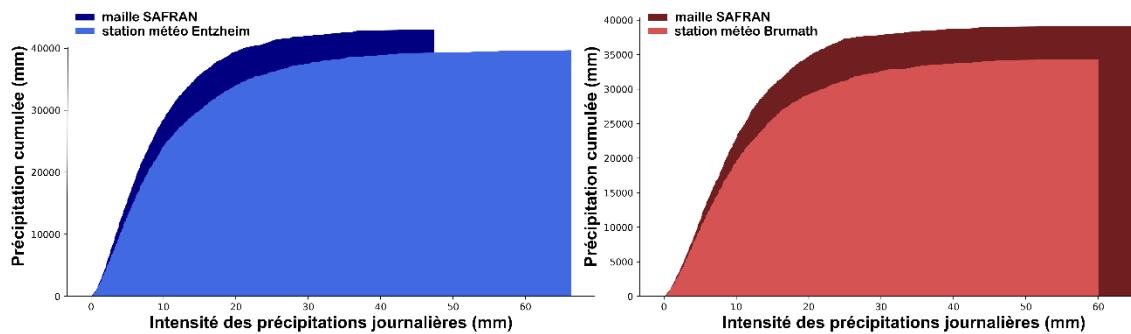


Figure 39. Comparaison des précipitations cumulées en fonction de l'intensité des pluies journalières des données de station météo et de la maille SAFRAN (classées par ordre croissant) : à gauche pour Entzheim (01/08/1958 - 31/12/2021), à droite pour Brumath (01/01/1975 - 31/12/2021).

Le modèle SAFRAN présente une tendance à surestimer les précipitations cumulées d'environ 10 % sur les deux sites étudiés (Entzheim et Brumath), tout en simulant un nombre d'événements pluvieux inférieur à celui observé. La Figure 39 illustre la répartition des précipitations cumulées en fonction de l'intensité des précipitations journalières. Les résultats montrent que SAFRAN surestime particulièrement les précipitations journalières supérieures à 10 mm, avec un excès d'environ 10 %, tandis que les précipitations de faible intensité sont sous-estimées. À Entzheim, cette surestimation est particulièrement marquée pour les précipitations de moyenne intensité, comprises entre 15 et 35 mm. À Brumath, l'écart est encore plus net pour l'ensemble des événements supérieurs à 8 mm. La Figure 39 met également en évidence les difficultés de SAFRAN à simuler correctement les événements extrêmes : à Entzheim, les précipitations les plus intenses sont sous-estimées, avec un maximum simulé d'environ 45 mm contre 65 mm observés. À l'inverse, à Brumath, SAFRAN tend à surestimer ces événements extrêmes.

Ces résultats sont confirmés par la comparaison des précipitations annuelles présentée en Figure 40, où l'on observe une bonne concordance des moyennes pour l'année 1999. Toutefois, SAFRAN tend à sous-estimer les précipitations les plus intenses, tandis qu'il

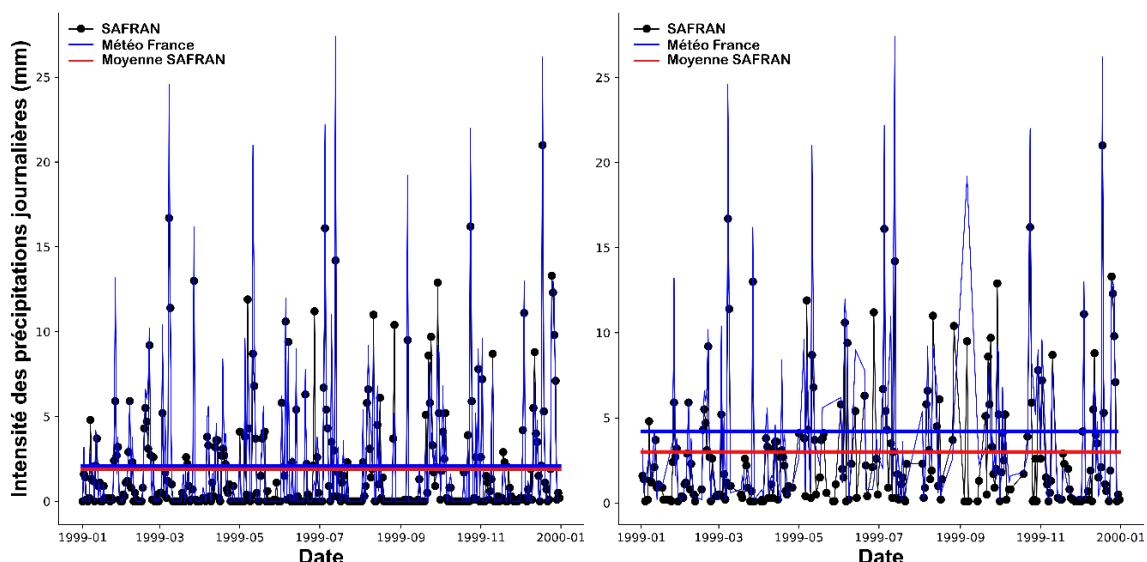


Figure 40. Intensité journalière des précipitations en 1999 pour la station météo d'Entzheim et SAFRAN : à gauche avec toutes les données, à droite sans les précipitations nulles.

surestime fréquemment celles de moyenne intensité. En excluant les jours sans précipitation, la moyenne des valeurs observées à la station météorologique d'Entzheim s'avère nettement supérieure à celle fournie par SAFRAN. Cela suggère que les événements pluvieux intenses, présents dans les observations, contribuent fortement à éléver la moyenne annuelle, alors que les données SAFRAN restent centrées autour de valeurs plus modérées, traduisant une atténuation des extrêmes.

La capacité des modèles climatiques à reproduire les précipitations extrêmes peut être évaluée à l'aide de la distribution de Gumbel, qui permet de comparer les valeurs maximales extraites de différents jeux de données. Cette approche permet d'identifier quelles intensités de précipitations sont représentées dans chaque source de données et d'en évaluer la représentativité relative. La Figure 42 présente une comparaison entre les précipitations extrêmes observées par les stations Météo-France et celles simulées par SAFRAN. Les résultats confirment une sous-estimation systématique des précipitations intenses par SAFRAN sur le site d'Entzheim. La comparaison avec les données issues du portail DRIAS met également en évidence une forte variabilité selon les modèles climatiques, quant à leur capacité à simuler les événements extrêmes (Figure 42).

Certains modèles, tels que ALADIN, RCA4\_EARTH et REMO2015, parviennent à simuler de manière satisfaisante les pluies maximales journalières associées à des périodes de retour allant de l'annuelle à la centennale. Toutefois, la majorité des modèles ont tendance à lisser et à sous-estimer les événements extrêmes, ce qui se traduit par une courbe modélisée située en dessous de celle des observations dans la distribution de Gumbel. Sur le site de Brumath, l'analyse des maxima annuels montre une tendance inverse : tous les modèles DRIAS présentent une surestimation systématique des précipitations extrêmes par rapport aux données observées (Annexe 3). Concernant les scénarios climatiques, les écarts entre les précipitations extrêmes simulées et observées sont moins marqués sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, alors qu'ils sont significativement plus dispersés sous RCP 2.6, traduisant une incertitude plus forte dans la modélisation des extrêmes dans ce scénario. Afin de mieux caractériser ces événements extrêmes, l'utilisation de données horaires issues d'EURO-CORDEX pourrait s'avérer pertinente. En effet, les données journalières entraînent un premier niveau de lissage, masquant en partie les intensités maximales réelles.

#### 1.4 Conclusion sur les données climatiques locales

Comme indiqué précédemment, les données issues des modèles climatiques n'ont pas vocation à être directement comparées aux données observées. Cette prudence méthodologique s'explique par la variabilité inhérente entre les différentes mailles et par le fait que l'évaluation des modèles repose avant tout sur les tendances spatiales et temporelles à moyen et long terme, et non sur la reproduction fidèle de données climatiques ponctuelles. Néanmoins, dans le cadre de notre démarche, il nous a semblé pertinent de produire une comparaison localisée des tendances entre données simulées et données observées. Cette initiative s'explique par le choix de fonder la modélisation des futurs co-construits avec les acteurs locaux sur une seule maille climatique représentative du territoire de la Souffel. Afin de mieux cerner les limites et les potentialités de cette maille, deux analyses ont été menées sur les variables clés que sont les températures et les précipitations.

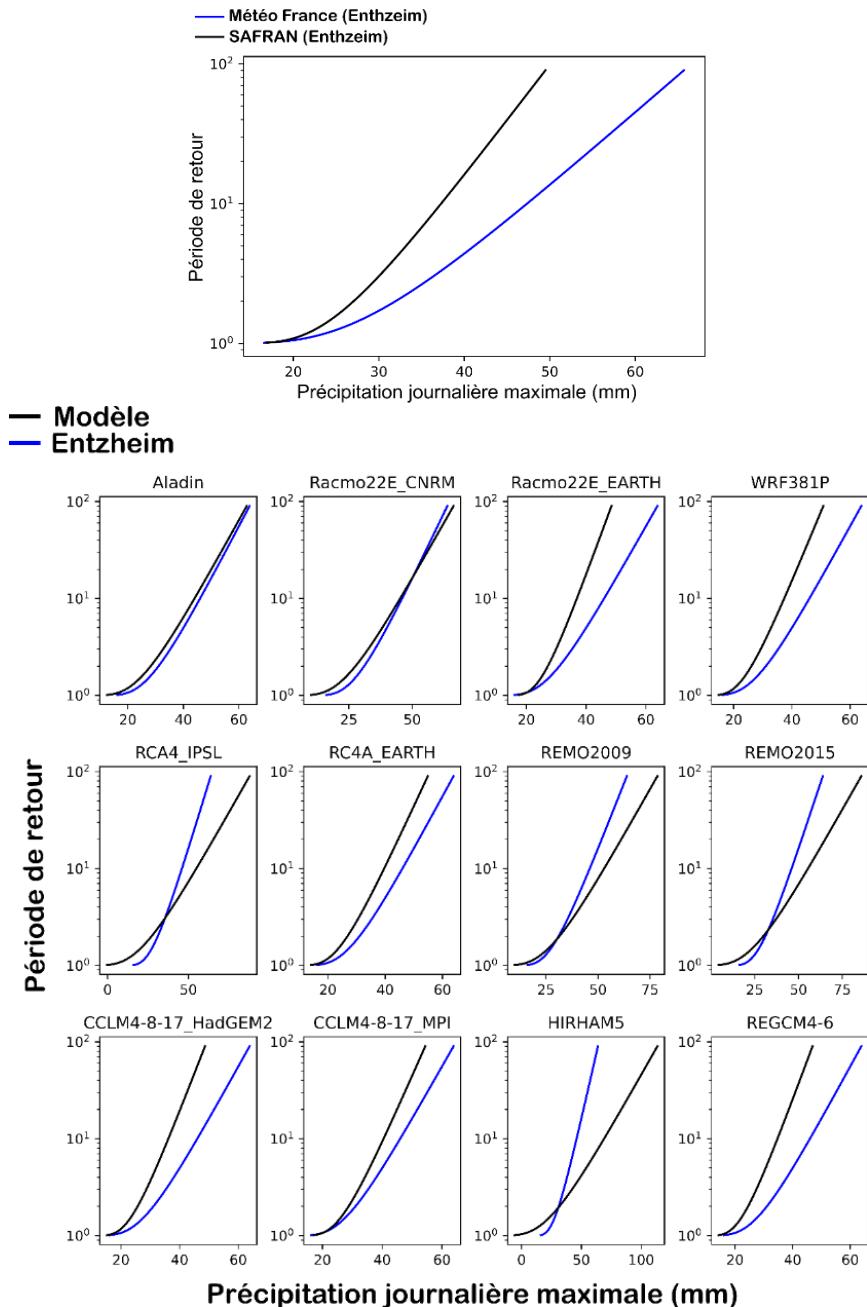


Figure 42. Distribution de Gumbel entre données simulées (SAFRAN) et observées de Météo France à Entzheim sur la période historique (1958-2021) (en haut) et entre les modèles climatiques (EURO-CORDEX) et observées simulées (SAFRAN) sur la période historique (1950-2005) (en bas).

La première analyse a porté sur la capacité des modèles à reproduire les tendances observées sur les variables températures et précipitations. Les résultats indiquent que les simulations restituent correctement l'évolution des températures, ce qui s'explique par la forte inertie de cette variable, sa régularité saisonnière et la relative facilité de son interpolation spatiale. Les écarts entre données simulées et observées demeurent limités, ce qui renforce la confiance dans l'utilisation de cette variable pour la modélisation agro-hydrologique. En revanche, les précipitations donnent lieu à des résultats plus nuancés. Une surestimation des cumuls est observée, de l'ordre de 10 % en moyenne, et sont assez marqués durant la période hivernale (de novembre à février). Cette surestimation s'accompagne d'un biais structurel dans la manière dont les modèles traitent les événements pluvieux extrêmes. La seconde analyse s'est d'ailleurs focalisée sur la capacité des modèles climatiques à restituer les précipitations

intenses. Les résultats montrent que ces événements sont globalement sous-représentés. Les modèles ont tendance à lisser les extrêmes, un effet accentué par le pas de temps journalier utilisé, mais aussi par la complexité des interpolations pour la variable précipitation, qui est soumise à une forte variabilité spatiale et temporelle. Le système SAFRAN, utilisé pour la reconstitution des données d'observation, rencontre également des difficultés à modéliser les pluies intenses, en raison de leur caractère localisé. Cette limitation devient particulièrement problématique dans le contexte du changement climatique, où la fréquence et l'intensité de ces événements extrêmes sont appelées à augmenter ([Seneviratne et al., 2021](#)).

Malgré ces biais, il demeure possible et pertinent d'utiliser les données issues des modèles climatiques, à condition d'en reconnaître les limites. Il est essentiel, notamment, de garder à l'esprit la variabilité interannuelle marquée des précipitations, en particulier durant la saison hivernale, ainsi que la capacité limitée des modèles à capturer les extrêmes hydrologiques. Dans notre cas, les tendances générales sont correctement restituées avec une marge d'erreur acceptable, estimée à environ ±10 %, ce qui justifie leur utilisation dans la modélisation agro-hydrologique à l'échelle du territoire. Pour enrichir les futurs climatiques simulés et y intégrer davantage de variabilité, nous mobiliserons également les données issues de la base Explore 2, qui propose des scénarios climatiques enrichis.

## 2. Perception du changement climatique par les participants

Le premier atelier a permis d'explorer la perception du changement climatique par les participants, en partie à travers l'analyse des données scientifiques présentées dans la première section de ce chapitre. Cette section présente le cadre conceptuel dans lequel l'atelier a été produit, puis retrace le déroulement complet de l'atelier et propose une analyse des échanges verbaux issus des deux panels, l'un composé d'agriculteurs, l'autre d'animateurs territoriaux. Enfin, les résultats sont présentés puis discutés au regard du cadre d'analyse précédemment présenté.

La conception de cet atelier repose sur une première hypothèse : les changements de pratiques peuvent être activés et/ou amplifiés en confrontant les acteurs aux effets du changement climatique, et plus précisément aux impasses prévisibles du scénario tendanciel (e.g. le marché agricole ou la PAC). C'est à partir de cette hypothèse que l'atelier a été structuré autour de cette problématique via une échéance très lointaine qui permet de montrer des changements climatiques significatifs et d'envisager une transition progressive, au risque d'une certaine forme de désengagement. Dans la mesure où le changement climatique induit, même à petite échelle, des ajustements dans les pratiques agricoles, nous faisons également l'hypothèse qu'il s'agit d'un thème mobilisateur pour les acteurs locaux. Il est donc susceptible de favoriser une participation large et représentative des différentes parties prenantes du territoire. Une seconde hypothèse vient compléter ce cadre : les pratiques mises en œuvre dans une logique d'adaptation peuvent également, si les discussions sont bien cadrées, s'inscrire dans une démarche plus globale de gestion environnementale. Cela est particulièrement vrai pour les enjeux liés à la ressource en eau, tant en termes quantitatifs que qualitatifs.

### 2.1 Cadre conceptuel et méthodologie

## *A propos de l'atelier*

Cet atelier poursuit un double objectif. D'une part, il vise à mobiliser les expériences personnelles et professionnelles liées au changement climatique, afin de favoriser l'engagement des acteurs locaux dans une transition territoriale à visée environnementale, en testant l'intérêt et l'adhésion d'un public impliqué dans les systèmes agricoles et la gestion de l'eau. D'autre part, il cherche à encourager une réflexion collective sur l'évolution des pratiques à moyen terme. L'intégration des agriculteurs et des gestionnaires de l'eau dans un dispositif participatif, centré sur l'élaboration d'un diagnostic partagé des enjeux climatiques, s'avère particulièrement pertinente pour plusieurs raisons :

- Les différents panels sont directement confrontés aux effets du changement climatique depuis plusieurs années ([Adger et al., 2007](#))
- Certaines pratiques ont déjà été modifiées, individuellement et principalement via des processus d'expérimentation, comme observé précédemment et étayé dans la littérature ([MacMillan & Benton, 2014](#)). On qualifie ces changements de pratiques peu encadrés d'« adaptations autonomes » ([Smit et al., 2000](#)). Ils sont initiés soit individuellement, soit au sein de communautés restreintes, en réponse aux perturbations et aux dommages causés par le changement climatique. Bien qu'ils diffèrent selon les contextes locaux, en particulier en fonction des systèmes agricoles, on retrouve des ajustements similaires dans les régions fortement exposées au changement climatique (modification des périodes de semis, modification des assolements, utilisation de cultures rustiques nécessitant moins d'eau, etc.), comme en Afrique, en Asie et en Amérique du sud ([Kritsjanson et al., 2012](#) ; [Below et al., 2010](#) ; [Burhnam & Ma, 2015](#)) mais aussi en Europe ([Zhao et al., 2022](#)).
- La participation active des parties prenantes permet de concevoir collectivement des solutions durables dans un contexte de gestion soutenable des ressources ([Willson & Roderick, 2017](#)), tout en rendant ces solutions plus acceptables lorsqu'elles sont co-construites ([Rounsevell & Metzger, 2010](#)).

La littérature montre l'efficacité des démarches participatives sur l'adaptation des pratiques agricoles au changement climatique et la capacité de ce sujet à mobiliser un large public ([Gramberger et al., 2014](#) ; [Akompab et al., 2012](#) ; [Willson & Roderick, 2017](#) ; [Bourgeois & Sette, 2017](#) ; [Nalau & Cobb, 2022](#)). Toutefois, il est important de noter que l'intérêt suscité par les enjeux climatiques peut varier et dépend fortement du contexte local : dans certains cas, ils ne constituent pas un levier de mobilisation, en particulier lorsque les enjeux de disparition des terres agricoles sont forts à court terme ([Garin et al., 2015](#)). Dans la plupart des cas, ces initiatives permettent néanmoins d'aborder d'autres sujets d'intérêt comme la viabilité des pratiques agricoles dans les décennies à venir.

La majorité des ateliers aboutissent à une meilleure compréhension des effets du changement climatique et à l'ouverture de discussions sur les mesures d'adaptation possibles ([Nalau & Cobb, 2022](#)). Cependant, peu d'études mettent l'accent sur la perception des risques climatiques, ce qui limite les possibilités de transformation durable à l'échelle des exercices de planification ([Nalau & Cobb, 2022](#) ; [Bosomworth et al., 2017](#)). De plus, les effets concrets

de ces ateliers sur les pratiques des participants restent difficiles à évaluer sans un suivi de long terme. S'il est difficile d'obtenir des données sur des changements de pratiques collectifs, ces dispositifs contribuent néanmoins à accroître la vigilance des participants face aux évènements climatiques extrêmes, tout en renforçant leur adhésion aux mesures d'adaptation ([Preston et al., 2015](#)). La question reste de savoir si ce type d'exercice, associé à des démarches prospectives, permet de prendre des décisions collectives efficaces face aux effets du changement climatique et d'en faciliter l'application.

### *Stratégies d'adaptation déjà observées*

En complément, la littérature apporte un éclairage sur les stratégies d'adaptation déjà mises en œuvre par les agriculteurs dans les zones soumises aux effets du changement climatique ([Below et al., 2010](#) ; [Billah et al., 2015](#)). Ces stratégies sont généralement orientées vers la réduction des risques (diversification des cultures, choix de cultures plus résistances aux sécheresses...), en particulier dans les petites exploitations. En effet, elles sont particulièrement contraintes de modifier leurs pratiques car les mauvaises récoltes, même ponctuelles, mettent en péril leur activité, contrairement aux grandes exploitations agricoles. Celles-ci adoptent fréquemment des pratiques de gestion environnementale : gestion durable des sols, gestion intégrée de l'eau et sont également à l'origine d'innovations, en particulier agronomiques ([Cohn et al., 2017](#) ; [Altieri & Nicholls, 2013](#) ; [Burhnam & Ma, 2015](#)). Ces pratiques durables permettent de répartir les productions et de sécuriser les revenus, à condition que les débouchés économiques existent pour valoriser ces produits. Les agriculteurs de petites et moyennes exploitations agricoles optant pour une gestion environnementale peuvent être désignés comme des agents de changement ([Mermet et al., 2005](#)), potentiellement moteurs dans des processus participatifs qui visent à modifier les pratiques agricoles en vue d'atteindre des objectifs environnementaux.

Néanmoins, ces stratégies impliquent souvent des coûts supplémentaires, notamment pour l'embauche de main-d'œuvre. Pour y faire face, les exploitants ont parfois recours à des formes de mutualisation des ressources humaines ou matérielles entre exploitations similaires ([Burhnam & Ma, 2015](#)) ou à produire des denrées stockables pour les vendre ultérieurement, lorsque les prix sont favorables ([Agrawal, 2009](#)). Plusieurs auteurs soulignent l'importance du soutien public et privé pour accompagner le changement de pratique ([Kritsjanson et al., 2012](#) ; [Cohn et al., 2017](#) ; [Altieri & Nicholls, 2013](#)), tandis qu'en Europe, le désengagement des Etats, notamment à travers la suppression ou la réforme des systèmes d'assurance contre les pertes de récoltes, est notable face à la multiplication des évènements climatiques extrêmes ([Zhao et al., 2022](#)). En effet, l'adoption de pratiques agricoles durables dépend fortement des ressources économiques disponibles ([Mertz et al., 2010](#)). Les exploitants ayant les moyens d'accéder au crédit ou de modifier leurs pratiques sont plus enclins à mettre en place des stratégies d'adaptation, en comparant les opportunités économiques aux risques émergents. Plus les exploitants disposent d'atouts financiers et moins ils sont dépendant de crédits déjà opérés, plus ils adoptent des mesures de gestion environnementale ([Burhnam & Ma, 2015](#)). En Europe, notamment dans le Sud, le manque d'eau constitue le principal facteur de vulnérabilité lié au changement climatique, auquel s'ajoutent des évènements extrêmes peu prédictibles ([Kalfagianni & Kuik, 2016](#)). Face au risque de sécheresse, deux types de stratégies coexistent : soit le recours à des espèces résistantes à la sécheresse (gestion environnementale), soit la mise en place de systèmes de

stockage des ressources, en particulier de l'eau, pour augmenter les capacités d'irrigation ([Zhao et al., 2022](#)).

#### *Ressource en eau et arbitrages territoriaux*

Ce dernier point soulève une question majeure dans les territoires agricoles : celle de la gestion quantitative de la ressource en eau dans un contexte de sécheresses croissantes. L'installation de nouveaux systèmes d'irrigation, y compris sur le territoire étudié, impose de réfléchir à l'arbitrage entre les besoins agricoles et ceux d'autres usages. Les discussions doivent porter sur le choix des cultures, la superficie irrigable et l'optimisation des techniques, éclairées par des scénarios climatiques anticipant la disponibilité future en eau ([Pulido-Velasquez et al., 2022](#)). Ces débats doivent également s'inscrire dans une réflexion plus large sur la planification de l'usage des sols et le partage équitable des ressources entre zones agricoles et urbaines. Cette planification inclut la gestion des réservoirs et leur pertinence face à l'augmentation de l'évapotranspiration, la réduction des pertes dans les réseaux de distribution, la répartition des ressources souterraines et leurs aspects écologiques. Elle doit aussi inclure la gestion qualitative de la ressource en eau (e.g. l'irrigation peut affecter les facteurs de dilution). De plus, le changement climatique modifie la qualité de l'eau par des hausses de température, des variations de concentrations en nutriments et des altérations dans le transport de matière organique ([Whitehead et al., 2009](#)). Ces transformations menacent les écosystèmes fluviaux, posant des risques pour la biodiversité et la potabilité des réserves en eau. La mise en place de mesures incitatives telles que des taxes pour encourager la conservation des ressources en eau peut également être discutée ([Girard et al., 2015](#)). Ces échanges avec les acteurs locaux permettent de hiérarchiser les actions et mesures envisageables, d'en évaluer l'acceptabilité, et d'en examiner l'équité afin de mieux anticiper leur mise en œuvre progressive face aux effets du changement climatique ([Miller & Belton, 2014](#)).

#### *La place de l'usage de la technologie*

Enfin, des stratégies s'appuient également sur l'innovation technologique, mais cette orientation fait débat. Certains auteurs considèrent que l'état actuel des connaissances est insuffisant pour garantir son efficacité dans un contexte où ces technologies n'ont pas encore été éprouvées. Ils soulignent que promouvoir la technologie comme une solution centrale pourrait détourner l'attention d'enjeux fondamentaux et constituer un écueil à éviter ([Eriksen et al., 2011 ; Agrawal, 2009](#)), notamment la préservation de la biodiversité ([Næss et al., 2005](#)), ou poser des questions de soutenabilité, notamment en matière de consommation de ressources naturelles ([Eriksen et al., 2011](#)). À l'inverse, d'autres travaux valorisent l'intégration raisonnée de technologies déjà disponibles (e.g. les drones, le GPS ou les images satellites), en complément de pratiques agricoles écologiques ([Sheer et al., 2012 ; Jena, 2024](#)). Ces études montrent aussi que l'intégration de solutions technologiques peut faciliter l'engagement des agriculteurs dans des stratégies d'adaptation et d'atténuation, en particulier lorsqu'elles réduisent les risques de perte de récolte ([Truelove et al., 2015](#)).

## **2.2 Organisation de l'atelier**

L'atelier a été organisé à deux reprises : une première fois avec un panel de huit agriculteurs à Truchtersheim, dans la salle du Trèfle où se réunit régulièrement la profession agricole, puis une seconde avec un panel de neuf chargés de mission eau, territoire ou agriculture au siège du SDEA. Cet atelier a également été co-structuré et animé par Benoît Labbouz (cf. [chapitre 1, section 2.4](#)) Il s'articule autour de trois axes : i) engager une discussion collective sur les perceptions individuelles des effets du changement climatique ; ii) confronter les données climatiques disponibles aux expériences vécues et partagées ; et iii) s'appuyer sur ces ressentis pour amorcer une réflexion sur l'ajustement nécessaire des pratiques face aux effets du changement climatique. Ces réflexions émergent à travers un apprentissage mutuel (*Blackstock et al., 2007*), nourri par des échanges en binômes et en groupe. Ces discussions favorisent le partage d'expériences, enrichies par les données scientifiques présentées.

Voici le détail du déroulement de l'atelier :

**Introduction (5')**

- Présentation du projet
- Objectifs et séquences de l'atelier

**Séquence 1 : Les perceptions du CC (30')**

Quelle est votre perception de l'évolution du climat dans votre environnement ?

Quelle sont les conséquences sur votre pratique ?

(*d'abord une discussion en binôme (10') / puis une mise en commun (15')*)

**Séquence 2 : Présentation des données (40')**

Présentation des données historiques ET des résultats de la modélisation (20')

Discussion collective (20') :

Quels indicateurs pertinents pour décrire l'évolution du CC ?

Réactions suite au contenu des séquences 1 et 2 (convergences et divergences) ?

**Séquence 3 : Les facteurs d'évolution des pratiques et les risques (20')**

Quels sont les risques actuels et à venir pour l'agriculture du BV ?

Quels sont les facteurs d'évolution qui pourraient faire évoluer l'agriculture ?

(*d'abord une discussion en binôme (10') / puis une mise en commun des éléments jugés « prioritaires » (10')*)

**Conclusion et discussion générale (20')**

Discussion collective, avec prise de parole libre

La première notion abordée avec les acteurs est la perception du changement climatique à l'échelle locale, notamment dans leur quotidien professionnel. En effet, l'expérience personnelle du changement climatique favorise une adaptation aux transformations qui en découlent (*Blennow et al., 2012*), renforce la conviction de son existence et soulève des questions sur l'évolution des pratiques (*Wolf et al., 2013*). Cette expérience du changement climatique est appuyée par une présentation des données météorologiques passées, présentes et des données climatiques futures. Toutefois, la présentation de ces données peut parfois être accueillie avec méfiance (*Moser & Ekstrom, 2010*), ce qui peut freiner l'engagement (*Pidgeon & Fischhof, 2011*). Il est cependant essentiel de fournir une base

scientifique ([Tippett et al., 2007](#)), et de les associer à des expériences locales afin de développer une compréhension plus complète du système ([Johnson et al., 2004](#) ; [Stringer & Reed, 2007](#)) et de soutenir les perceptions des participants.

La seconde notion abordée concerne la perception des risques par les participants, ce qui représente un facteur clé dans le processus d'engagement. De manière générale, plus un risque est perçu comme imminent<sup>4</sup> et susceptible de causer des dommages importants, plus le niveau d'engagement des acteurs augmente ([Grothmann and Patt, 2005](#) ; [Adger et al., 2009](#)). Lors de cet atelier, nous avons cherché à aborder ces risques, notamment dans le domaine agricole. Les facteurs d'évolution, quant à eux, sont abordés dans l'optique de discuter des potentiels chemins d'adaptation à l'échelle du territoire ([Werners et al., 2021](#)).

### *Quelques éléments sur la présentation des données*

Les résultats présentés lors du premier atelier sont issus des mailles climatiques les plus proches du centre du territoire étudié (Figure 35). L'analyse couvre à la fois les évolutions climatiques déjà observées depuis la période 1950-2022 et les projections futures pour la période 2022-2070. Voici un aperçu des éléments abordés au cours de l'atelier.

Dans un premier temps, les tendances globales concernant les températures et les précipitations ont été présentées (Figure 43 & Figure 44).

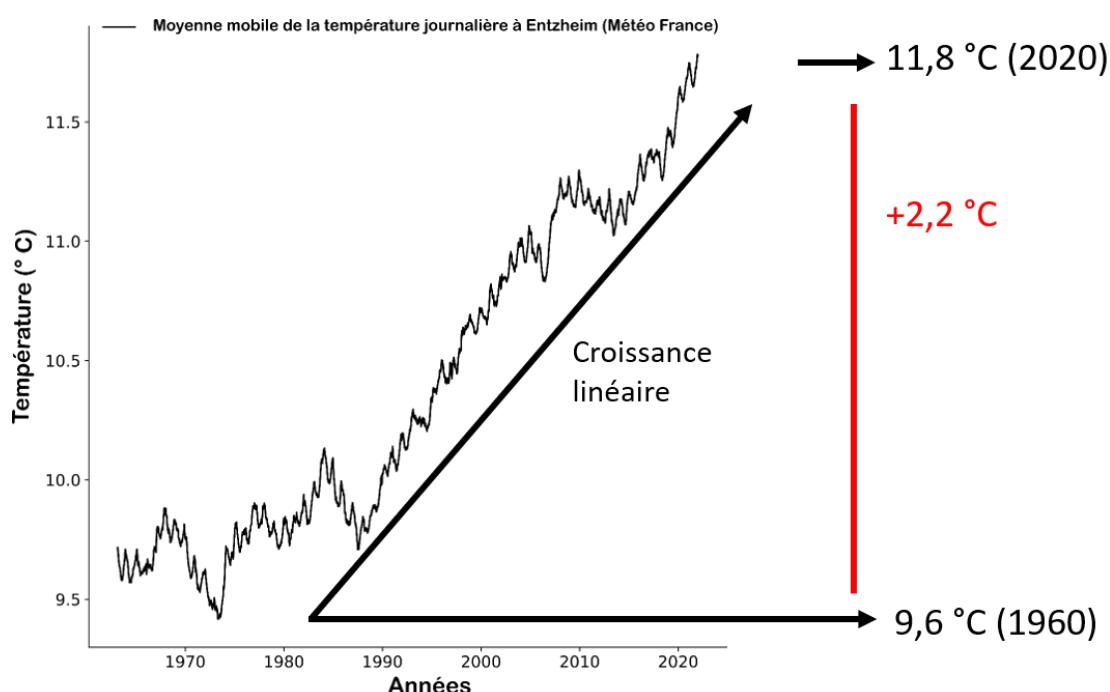


Figure 43. Moyenne mobile sur les valeurs des températures journalières issues de la station météo d'Entzheim entre 1948 et 2021 (moyenne glissante lissée toutes les 10 ans).

<sup>4</sup> Bien que les projections climatiques soient produites à l'horizon 2070, les risques se manifestent depuis 5 à 10 ans

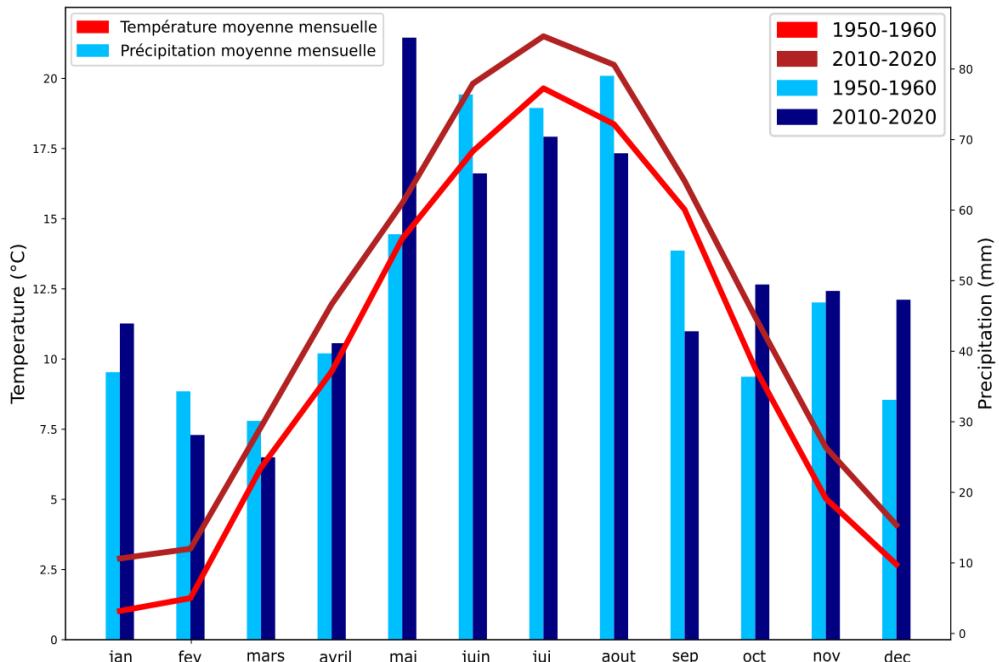


Figure 44. Diagramme ombrothermique comparant les moyennes mensuelles des données observées à la station d'Entzheim (MétéoFrance) entre les décennies 1950-1960 et 2010-2020 des températures ( $^{\circ}$  C) en rouge et du cumul de précipitation (mm) en bleu.

La Figure 43 illustre l'évolution des températures journalières moyennes à travers une moyenne mobile entre 1948 et 2022. On y observe une augmentation marquée des températures annuelles, passant de valeurs comprises entre 9,5 et 10  $^{\circ}$ C dans les années 1960 à des moyennes situées entre 11,5 et 12  $^{\circ}$ C autour de 2020.

La Figure 44 propose une analyse ombrothermique mensuelle, permettant de mieux appréhender les effets saisonniers du changement climatique, en particulier sur l'agriculture. L'étude comparée de deux décennies révèle non seulement une hausse généralisée des

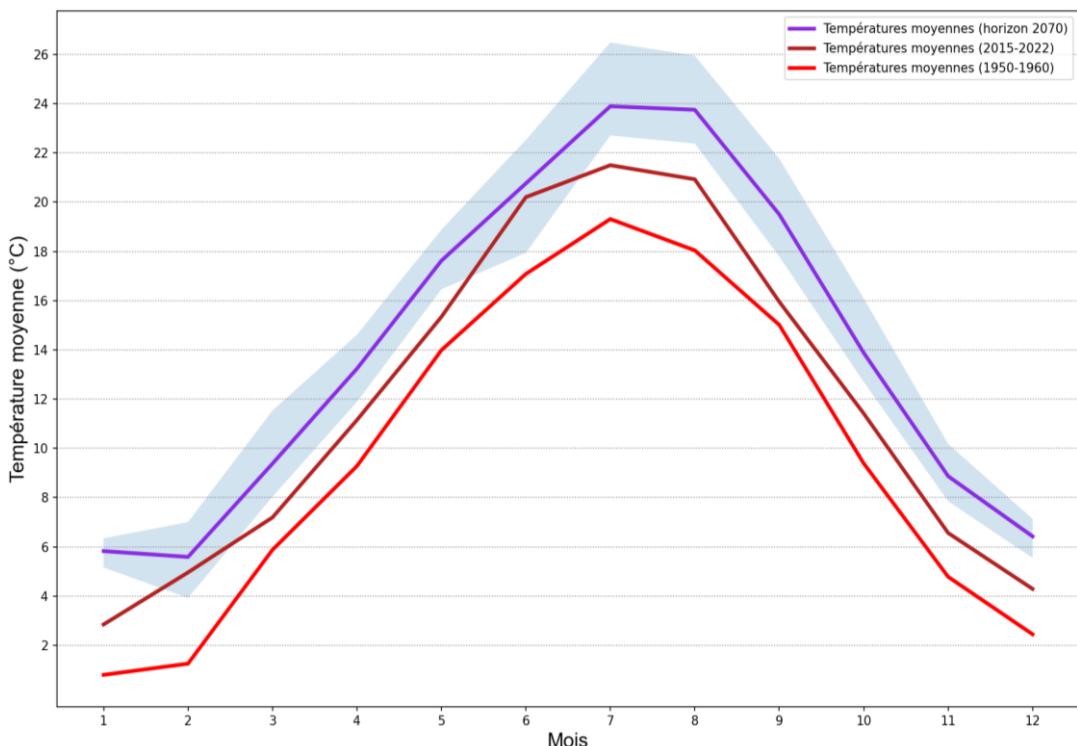


Figure 45. Comparaison des moyennes de température mensuelles entre deux périodes à partir de données observées (1950-1960 ; 2015-2022) et l'horizon 2070 à partir des modèles climatiques EXPLORE 2 (1965-1975).

températures, plus prononcée en été, mais aussi une transformation significative du régime des précipitations. Si les cumuls annuels restent relativement stables, leur répartition saisonnière évolue nettement : les étés deviennent plus secs, aggravant le stress hydrique et thermique, tandis que les précipitations augmentent au printemps et à l'automne. Ces périodes, souvent marquées par des sols nus entre deux cultures, présentent alors un risque accru de lessivage et d'érosion.

Les projections climatiques issus des modèles climatiques du projet EXPLORE 2 à l'horizon 2070 confirment la poursuite de ces tendances. Elles sont accompagnées de bandeaux d'incertitude pour en illustrer la variabilité (Figure 45), ainsi que d'une évaluation des risques potentiels pour les cultures et le bétail. Selon les scénarios présentés, les températures moyennes devraient augmenter d'environ +2 °C d'ici 2070 par rapport à la période 2015-2022, avec une intensification notable des chaleurs estivales. Cette élévation thermique aura des conséquences importantes : pour les cultures, notamment le maïs et le blé, le stress thermique accroîtra le risque de pertes de rendement en particulier sans irrigation ; pour l'élevage, les fortes chaleurs rendront le pâturage estival difficile. Par ailleurs, la production de fourrages sera fortement impactée, obligeant à recourir à des sources d'alimentation externes, entraînant ainsi des coûts supplémentaires pour les exploitations agricoles.

### 2.3 Résultats de l'atelier

Cette partie présente les résultats de l'atelier portant sur le changement climatique. Il s'agit d'une présentation générale des principaux sujets discutés dans le cadre de cet atelier par les panels agriculteur et animateur. Ces constats locaux seront mis en perspective avec la littérature dans la section suivante ([2.4](#)).

D'abord, la présentation des projections climatiques a été très bien accueillie par les deux panels. Elle a davantage conforté les observations et les expériences personnelles des participants. Cette intervention a suscité de nombreuses questions, sans provoquer de remise en cause majeure des témoignages précédents.

#### *Les évolutions de pratiques induites par les effets du changement climatique*

Un premier constat important est que les deux panels, **animateurs** et **agriculteurs**, reconnaissent unanimement la réalité du changement climatique. Les agriculteurs en particulier ont une expérience très forte des aléas climatiques et de l'augmentation de la fréquence des événements :

« Sur les cinq dernières années, chaque année on a eu un problème climatique. »  
(agriculteur 1)

Pour faire face à ces fluctuations et aux pertes financières associées aux dommages agricoles, les agriculteurs présents à l'atelier optent pour la souscription à des assurances, dont les indemnités deviennent chaque année plus complexes à obtenir, tandis que les coûts des contrats ne cessent d'augmenter. Outre les assurances, le changement climatique a déjà contraint l'ensemble des participants à des modifications de leurs pratiques professionnelles. Ces changements sont de différents ordres.

#### ❖ Modification des assolements

Une première adaptation concerne le décalage des périodes de semis pour les cultures existantes, en réponse aux évolutions climatiques observées : « On n'implante plus de variétés tardives, que des précoces » explique l'un des agriculteurs. Le fait de modifier la date de semis permet de différencier les stades de développement des plantes afin de conserver une partie des rendements face aux aléas climatiques. Il est question de limiter le risque de gel tardif en sortie d'hiver et le risque de stress hydrique en fin de cycle (ce qui est l'effet recherché pour les semis précoces sur le territoire). Les conseillers agricoles expliquent recommander de privilégier les cultures d'automne, en particulier en raison des gelées tardives.

Certaines cultures « réapparaissent » également sur le territoire, comme le colza ou le tournesol. Cette dernière a l'avantage d'être une culture particulièrement résiliente face aux épisodes de sécheresse et demande des apports en eau à des stades de développement où elle est encore disponible dans la région. Il y a également de nouvelles cultures qui s'implantent pour faire face à de nouveaux marchés plus intéressants économiquement pour les agriculteurs. Il s'agit souvent de couverts intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), qui poussent aux inter-saisons, donc à des périodes où la sécheresse n'est pas encore trop intense et dont les contrôles de qualité peuvent être moins importants. Ces nouveaux débouchés, qualifiés de « para-agricoles » par les agriculteurs occupent une part croissante des cultures.

#### ❖ Modification des techniques agricoles

En plus de la modification des assolements, on observe des évolutions dans les techniques agricoles employées. La hausse des températures, surtout en été, et la faible recharge des sols due à la modification du régime des précipitations, créent des besoins accrus en irrigation pour la majorité des cultures, comme en témoigne un agriculteur : « sans eau aujourd'hui, c'est impossible ». Ces besoins hydriques croissants sont davantage ressentis pour les cultures spéciales<sup>5</sup> et notamment pour le maraîchage et la culture des fruitiers. La ressource en eau étant difficilement accessible sur ce territoire, les agriculteurs doivent recourir à l'eau du réseau, plus coûteuse que l'eau d'irrigation traditionnelle, ce qui crée un surcoût économique. La sécheresse des sols a également entraîné chez certains un changement vis-à-vis du travail du sol, notamment l'apparition du non-labour<sup>6</sup> :

« Le non labour, on y serait arrivé avec ou sans changement climatique, mais ça a accéléré la transition. [Le labour] c'est plus dur sur sol sec que sur sol humide. » (*agriculteur 3*).

L'évolution des techniques agricoles est aussi liée à l'augmentation de la pénibilité du travail, particulièrement en été, en raison de la hausse des températures. Par exemple, le binage<sup>7</sup> est une tâche physique qui requiert des conditions climatiques adaptées. Si la chaleur est trop forte, les agriculteurs remplacent la plupart du temps le binage par un accroissement de l'usage des herbicides. Sinon, cela requiert une refonte complète du modèle agricole (pose de

<sup>5</sup> **Les cultures spéciales** sont des cultures avec une grande valeur ajoutée (en fonction de leur rareté, leur qualité ou de la demande sur le marché). Elles se distinguent par leur rendement économique élevé.

<sup>6</sup> **Le non-labour** est une pratique qui consiste à ne pas retourner le sol lors du travail agricole. Il s'agit d'une technique plébiscitée en agriculture de conservation.

<sup>7</sup> **Le binage** consiste à remuer la couche superficielle du sol afin de l'ameublir et d'enlever les adventices.

couverts étouffant pour les adventices, utilisation de la concurrence directe de certaines adventices pour l'accès à des ressources...). La pénibilité du travail peut même atteindre des niveaux dangereux pour la santé des travailleurs :

« On a dû interrompre le binage, voire on le fait plus, il fait trop chaud et on ne tient plus le coup. » (*agriculteur 5*)

L'évolution des pratiques s'accompagne d'un renouvellement des repères agronomiques, construits empiriquement à partir des observations réalisées par les agriculteurs :

« On change aussi nos indicateurs agronomiques, maintenant le fourrage peut être utilisé comme indice thermique : la floraison a lieu plus tôt, lorsqu'il y a encore de l'eau dans le sol. » (*agriculteur 1*).

Bien qu'il s'agisse de perceptions et d'ajustements individuels, il est pertinent de noter que les agriculteurs disposent aujourd'hui d'un recul suffisant sur les évolutions climatiques pour identifier les paramètres les plus explicites servant de repères. Cela témoigne d'une installation durable des effets du changement climatique, perceptible depuis plusieurs années. Si certains indicateurs phénologiques, comme la floraison du fourrage, peuvent être mobilisés pour suivre ces évolutions, il demeure toutefois difficile de composer avec une double variabilité, saisonnière et interannuelle. Cette complexité est accentuée par la fréquence croissante des aléas climatiques extrêmes (sécheresses, gels tardifs, inondations, etc.) dont l'occurrence et l'intensité varient fortement d'une année à l'autre : « On a du mal à suivre ou à donner des conseils sur les itinéraires techniques à cause de la grande variabilité climatique » explique un conseiller agricole issu du panel animateur.

#### ❖ Modification des modes de vie et des pratiques de travail des agriculteurs

Les effets du changement climatique perturbent la régularité du rythme des travaux agricoles d'une année sur l'autre. Cette instabilité impose une vigilance accrue et une adaptation constante à des modifications de calendrier souvent difficiles à anticiper. Ces changements ont des répercussions sur la vie privée, notamment sur les temps libres et les vacances :

« Habituellement, on prenait des vacances entre la fin des moissons des blés et le début de l'ensilage<sup>8</sup>. Maintenant, il est possible d'ensiler mi-août et donc on doit annuler les vacances. » (*agriculteur 6*).

Les périodes de travail sont également plus intenses afin d'éviter les pertes de rendement trop importantes en cas d'évènement extrême dont les fréquences s'intensifient. Ainsi, les agriculteurs qui participent à l'atelier espèrent que les outils technologiques de surveillance et d'anticipation des évènements extrêmes se développent :

« Les AOD (outil d'aide à la décision) seront plus développé dans le futur, c'est sûr » (*agriculteur 2*).

---

<sup>8</sup> **Ensiler** : action de mettre en silo afin de conserver la production agricole

Plusieurs technologies sont déjà utilisées, notamment pour lutter contre la chaleur de plus en plus intense en été. C'est le cas par exemple pour faire face aux épisodes caniculaires afin de réduire le stress sur les bovins « On a installé des ventilateurs et ça c'est une nouveauté, il y a 15 ans, on n'en avait pas besoin » intervient un agriculteur.

Les nouvelles technologies sont aussi utilisées afin d'augmenter les gains de productivité, dans des secteurs parfois peu rémunérateurs où une partie des agriculteurs misent sur les moyens technologiques pour augmenter la rentabilité de leurs productions : « on en vit plus et donc on se lance dans les nouvelles technologies » (*agriculteur 2*). Ces nouveaux outils (satellites, drones, capteurs, robots...), utilisés en agriculture de précision, sont pourtant onéreux. Il y a donc une généralisation des usages des technologies chez les agriculteurs présents qui peut entraîner des dépenses importantes et induire une charge significative de temps de travail.

#### *Insatisfaction partagée par l'ensemble des acteurs sur le rôle de l'Etat*

L'un des freins au changement de pratiques évoqué par les participants concerne l'inconstance des directives de l'État, en particulier dans ses missions de régulation et de planification. Cette instabilité se manifeste notamment dans la coordination entre les politiques agricoles et les politiques environnementales, telles que la lutte contre la pollution de l'eau ou l'adaptation au changement climatique. Les participants soulignent également le manque de clarté de ces orientations, ainsi que les difficultés liées à leur mise en œuvre au sein des institutions locales.

##### ❖ Inefficacité des leviers d'action de la puissance publique

Le premier argument soulevé est l'absence de vision stratégique qui conduit à la mise en place de programmes dont les implications et contrecoups n'ont pas été assez réfléchies :

« Les décisions sont prises rapidement avec des applications réglementaires qui ne sont pas pensées dans la durée. C'est des mesures prises rapidement sans efficacité réelle, qui ne sont pas pensées sur le long terme mais pour satisfaire l'opinion publique ou pour simuler un changement ou une action politique. » (*agent de l'EMS*).

Ainsi, certains projets sont mis en œuvre sans réelle vision d'ensemble des enjeux liés à la protection de la ressource en eau ou à l'atténuation des effets du changement climatique. En l'absence de cohérence stratégique, ces projets peuvent s'avérer inefficaces, voire contre-productifs. Un agent de l'EMS cite, par exemple, l'autorisation de projets d'irrigation, y compris dans des zones où les prélèvements risquent d'altérer gravement le fonctionnement hydrologique. Cela concerne notamment les points de captage, où une diminution du volume d'eau disponible peut entraîner une dégradation de sa qualité. Ce type de décision, validée par l'État, peut également générer des tensions entre acteurs locaux, en particulier autour des enjeux de qualité de l'eau. Un autre exemple mentionné concerne le financement européen de plantations de haies en ripisylve. Selon les agriculteurs présents, ces projets ne prévoient ni financement, ni stratégie d'entretien, ce qui conduit à la dégradation progressive des haies pourtant initialement installées pour des raisons écologiques.

De manière plus générale, les décisions publiques sont perçues comme étant prises par des instances éloignées des réalités du terrain, ce qui constitue, selon les participants, un obstacle

majeur à la mise en œuvre efficace d'actions locales. Par ailleurs, plusieurs principes juridiques censés garantir la protection des écosystèmes, même à court ou moyen terme, ne sont pas appliqués dans les faits, ce qui alimente un sentiment de déconnexion entre la réglementation et les pratiques :

« Est-ce que dans le futur on va réellement faire appliquer le principe du pollueur-payseur ? » (*agent du SDEA*).

Les discours de l'Etat sont perçus comme ambivalents, notamment les positionnements de ministres chargés de questions différentes (e.g agriculture, environnement, énergie...). Il n'est donc pas simple de savoir quelle ligne directrice suivre parmi les « discours contradictoires et des orientations ambiguës » indique un agent de la chambre d'agriculture. Parmi les participants, la question de l'absence de véritable décision politique est assez partagée comme le montre ce témoignage d'un agriculteur :

« Or de manière générale il y a un manque de courage politique sur la recherche par exemple, alors que le monde agricole a besoin de soutien sur la recherche et développement. »

Ceci peut en partie expliquer la difficulté des agents de terrain et des agriculteurs de mettre en place des actions collectives.

Ce type de raisonnement se retrouve dans d'autres thématiques, notamment dans le consensus exprimé par les participants selon lequel la production agricole est largement conditionnée par les choix des consommateurs. Ces choix sont également perçus comme instables et fluctuants à l'instar du cadrage de l'Etat.

❖ Intégration des problématiques liées aux changements globaux dans le fonctionnement des institutions locales

L'intégration de la thématique du changement climatique se fait progressivement dans les institutions publiques comme le SDEA et la chambre d'agriculture :

« Tous les projets construits aujourd'hui dans les institutions le sont avec un volet climatique. » (*agent du SDEA*).

Néanmoins, la prise en compte des effets du changement climatique à moyen et long termes demeure limitée à l'échelle locale, principalement en raison d'un manque de connaissances à cette échelle. Les incertitudes qui entourent les effets du changement climatique, ainsi que l'ampleur potentielle des bouleversements qu'il engendre, compliquent l'adaptation des professionnels du secteur agricole. Par exemple, les conseillers agricoles éprouvent des difficultés à orienter les agriculteurs vers les itinéraires techniques les plus pertinents, du fait des fortes fluctuations interannuelles induites par le climat. Cette incertitude se traduit également par une incapacité à recommander de manière fiable les cultures à privilégier d'une année à l'autre.

Par ailleurs, des préoccupations subsistent autour de thématiques encore peu intégrées dans les projections climatiques locales comme la protection des captages d'eau potable ou les effets des variations quantitatives sur la qualité de l'eau. Une des réponses apportées consiste

à mobiliser de nouveaux moyens de prévention et d'action, notamment pour lutter contre la pollution des rivières et les risques d'inondation :

« On a du foncier qu'on attribue en priorité aux agriculteurs qui ont de bonnes pratiques. » (*agent du SDEA*).

Les moyens d'action sont tout de même encore limités pour s'adapter aux effets du changement climatique.

#### *Des préoccupations communes pour le futur*

Lors de la dernière séquence de l'atelier, portant sur la perception des risques et sur les facteurs d'évolution qui pourraient faire évoluer l'agriculture, plusieurs risques ont été identifiés par les différents panels. Ces risques sont inhérents aux perturbations climatiques et aux tendances actuelles qui pourraient s'accentuer.

❖ « Le risque... c'est de disparaître » (*agriculteur 3*).

Le risque de disparition du métier d'agriculteur sous sa forme contemporaine est considéré comme un risque majeur par l'ensemble des participants. Le territoire est structuré autour d'un modèle agricole dominé par des exploitations familiales qui mobilisent parfois du salariat en fonction de la taille des structures. Plusieurs facteurs pourraient faire disparaître ce modèle selon les participants :

- Des fluctuations climatiques qui rendent les récoltes irrégulières et provoquent des pertes financières trop grandes.
- La difficulté de recruter la main d'œuvre, notamment pour des travaux physiques, en particulier sous contrainte climatique.
- Un agriculteur exprime également « le risque que l'économie prenne trop de place dans la gestion des exploitations », en soulignant que cela pourrait favoriser les structures de type « firme », disposant des moyens financiers nécessaires pour recruter du personnel dédié à ces tâches. Ce n'est pas le cas des exploitations familiales, qui doivent souvent assumer seules l'ensemble des charges administratives. Dans ce contexte, le terme *économie* utilisé dans la citation semble recouvrir davantage la dimension administrative du travail agricole : il s'agit moins de contraintes économiques au sens strict que de la complexité croissante des démarches à effectuer pour se conformer aux exigences réglementaires, ou pour accéder aux aides de la PAC et de l'État. Cette charge administrative représente un frein important pour les petites structures, qui peinent à y faire face sans appui externe.

Un agent de la chambre d'agriculture souligne également que « le changement climatique est plus profitable [sic (moins dommageable)] aux gros qu'aux petits, car une exploitation avec une plus grande trésorerie peut absorber plus facilement les crises ».

- La perte d'attractivité du métier d'agriculteur et le problème de renouvellement des agriculteurs partant à la retraite dont les exploitations sont rachetées par de grandes exploitations, ce qui contribue à la concentration des terres agricoles par de grandes exploitations.

- Depuis la politique de modernisation agricole, la question de la transmission des méthodes et des savoirs est également une question centrale. Les populations agricoles déclinent fortement et les outils d'aide à la gestion se généralisent ce qui provoque une perte de mémoire des savoirs agronomiques.

#### ❖ Souveraineté alimentaire

La question de la souveraineté alimentaire est directement liée à la question climatique, comme le rappelle ce conseiller agricole :

« On va osciller entre de mauvaises et de bonnes années mais il y a un vrai risque pour les rendements. »

Ces oscillations sont majoritairement liées aux évènements extrêmes climatiques qui affectent directement les rendements des cultures. A ces phénomènes s'ajoutent « une augmentation des phénomènes d'érosion et de coulées de boue qui pourraient causer une perte de fertilité des sols » complète un agent de la chambre d'agriculture, ce qui causera un problème de productivité agricole à long terme.

Outre la question de la production agricole, la question de la rentabilité économique des exploitations est également posée. La région de la Souffel, le Kochersberg, est une région historiquement aisée d'Alsace due à ses sols fertiles. Du fait du difficile accès à l'eau couplé aux risques de sécheresse importants en été, la région pourrait perdre en prospérité :

« Il y a un risque d'appauvrissement de la région, le Kochersberg a toujours été une région riche, avec des corps de ferme bien entretenus, parce qu'il n'y a jamais eu de problème d'eau. Aujourd'hui ça devient un réel problème. » (*agent de la chambre d'agriculture*).

#### ❖ Intensification des conflits

Les participants ont également évoqué l'intensification des conflits déjà présents sur le territoire. Ces conflits, ressentis principalement par les agriculteurs comme des injustices, concernent deux enjeux majeurs : l'eau et l'occupation des sols. La question de l'eau se décline en deux aspects. D'une part, certains agriculteurs, qui prélèvent peu ou pas d'eau dans la rivière en raison de débits trop faibles et ont un accès limité aux nappes souterraines, expriment leurs besoins face à des sécheresses plus longues et plus sévères. D'autre part, une partie des tensions se concentre sur la qualité de l'eau, en particulier sa dégradation due aux pratiques agricoles conventionnelles :

« Si les débits diminuent encore ou que les polluants atteignent la nappe, on s'inquiète de devoir relever nos exigences et donc augmenter le prix de l'eau parce qu'il y aura besoin de traitements supplémentaires. » (*agent de l'EMS*).

Le second point de friction concerne le partage des terres, en particulier avec l'arrivée de néo-ruraux sur le territoire. Deux aspects sont soulignés : d'une part, le rachat de parcelles agricoles par des promoteurs immobiliers, qui favorise l'étalement péri-urbain. Cela entraîne

l'autre aspect qui est l'augmentation des tensions entre agriculteurs et nouveaux résidents « qui rejettent nos pratiques » selon les agriculteurs.

### *Quelles visions pour demain ?*

À l'issue de la séquence consacrée aux risques, la discussion s'est orientée vers les attentes relatives à l'avenir du territoire, en particulier en lien avec l'évolution des pratiques dans un contexte de changement climatique. Les propositions formulées par les participants convergent majoritairement vers la nécessité d'un accompagnement personnalisé :

« Il faudrait faire de l'accompagnement parcellaire car de nombreuses choses varient spatialement, et particulièrement pour la gestion de l'eau. » (*agriculteur 7*)

Il y a également des demandes concernant de l'accompagnement sur les questions agronomiques afin d'anticiper au mieux les changements climatiques futurs.

Un constat partagé entre les panels est que la question du changement de pratique ne peut être portée uniquement par les agriculteurs mais relève d'une transformation systémique :

- changement de préférences d'achat alimentaire des consommateurs
- multiplication des filières et des débouchés
- modification des conditions de travail des agriculteurs et de leurs conditions de rémunération pour rendre le travail plus attractif.

Une piste évoquée comme prometteuse dans chacun des panels est le recours à la technologie :

« On a de grands potentiels avec les technologies modernes, elles procurent beaucoup d'avantages. » (*agent de l'EMS*).

## **2.4 Discussion et perspective**

Les échanges issus de ce double atelier, bien qu'ils ne permettent pas de généraliser les résultats, en raison du nombre limité de participants (20 personnes au total), ouvrent une réflexion sur l'évolution des pratiques face aux effets du changement climatique. Ils explorent également la possibilité d'impliquer les parties prenantes du système agro-environnemental dans ce type d'exercice. Ces aspects sont discutés dans cette partie.

### ***Le changement climatique : un sujet d'intérêt et de mobilisation dans le système agricole***

#### *Intérêt pour le sujet du changement climatique et processus d'engagement des participants*

Le changement climatique est devenu un sujet d'intérêt majeur sur le territoire étudié, particulièrement pour le panel agriculteur, qui comprend différents profils (conventionnels, syndiqués, principalement moyennes exploitations...) et spécialités agricoles (polyculture-élevage, céréaliers, arboriculteur...). Les agriculteurs présents à cet atelier, bien que généralement peu sensibles aux questions environnementales, se sont montrés réceptifs au sujet, qui semble donc être un bon point d'entrée pour engager le dialogue. Par ailleurs, ce thème a suscité l'intérêt des institutions locales, qui cherchent notamment à mieux comprendre les futurs climatiques possibles pour le territoire.

## *Evolution des pratiques agricoles et perception des risques potentiels*

Les résultats de cet atelier montrent que certaines pratiques agricoles ont déjà évolué en réponse au changement climatique, sur le Kochersberg, principalement parmi les structures petites à moyennes, comme le décrit la littérature. Dans le Kochersberg, les possibilités d'innovation sont favorisées par la proportion significative de petites et moyennes exploitations (cf. [chapitre 2](#)).

Ces modifications concernent notamment :

- La variété de culture : on assiste à une ré-introduction de variétés rustiques adaptées aux conditions locales (conditions de sécheresse, résistance aux maladies...), diversification des cultures, changement de culture. Il s'agit des changements qui se produisent le plus rapidement ([Kritsjanson et al., 2012](#)). Si le phénomène de migration des cultures est visible sur le territoire, à l'instar de l'ensemble du continent (e.g. plantation de safran), le phénomène de diminution des surfaces agricoles liées au changement climatique observé en méditerranée n'est pas encore visible sur la Souffel ([Zhao et al., 2022](#)).
- Les itinéraires techniques : les pratiques de modification des dates de semis et de récolte, ainsi que la période de travail du sol sont déjà mises en place sur les parcelles agricoles alsaciennes. L'avancement des dates de semis pour les cultures de printemps et le retard pour les cultures d'hiver est une pratique généralisée en Europe, dont la justification est systématiquement liée au changement climatique ([Zhao et al., 2022](#)).
- La gestion des sols : ce type de modification est particulièrement visible à travers des pratiques de diminution, voire d'arrêt de labour sur le territoire. Néanmoins, les pratiques d'introduction d'intercultures, d'apport de fumier et de compost, de rotations des cultures ne sont pas encore visibles sur le territoire.
- La gestion de l'eau : différents projets visant au développement de l'irrigation (e.g. introduction de bassins de rétention ou de systèmes de récupération d'eau) sont en cours sur le territoire étudié, à l'image de ce qui se pratique déjà largement dans le sud de l'Europe ([Zhao et al., 2022](#) ; [Kalfagianni & Kuik, 2016](#)). En revanche, les pratiques agroécologiques visant à limiter l'évapotranspiration, comme le paillage ou la couverture végétale, restent encore marginales dans le bassin.
- La gestion des élevages : sur le territoire, l'accès aux pâturages durant l'été est de plus en plus limité en raison des fortes chaleurs. Pour y faire face, des solutions palliatives comme l'installation de ventilateurs sont mises en place. À l'échelle européenne, on observe également des évolutions marquées dans les systèmes d'élevage : réduction ou, au contraire, forte augmentation de la taille des cheptels selon les contextes, introduction d'espèces animales plus rustiques, et modification des régimes alimentaires du bétail, notamment avec

le recours accru au système de « cut and carry »<sup>9</sup>, que l'on ne voit pas encore apparaître sur la Souffel.

- Le recours à la technologie : deux types de technologies ont été abordés lors de l'atelier. Le premier concerne les technologies numériques et mécaniques, telles que les outils de surveillance ou les tracteurs de haute performance, déjà adoptés par certains agriculteurs du territoire. Le second type regroupe les technologies agronomiques, notamment la sélection de nouveaux cultivars<sup>10</sup> génétiquement modifiés pour mieux résister aux épisodes de sécheresse intense. Ces variétés, largement discutées par les participants ne sont toutefois pas encore autorisées sur le marché européen. Par ailleurs, des technologies de prévision climatique et de systèmes d'alerte précoce sont également utilisées dans plusieurs régions d'Europe ([Zhao et al., 2022](#)).

On retrouve ainsi, sur le territoire étudié, certaines grandes tendances observées ailleurs en Europe en lien avec les effets du changement climatique. Si certaines pratiques mises en place sont favorables à l'environnement, leur adoption ne relève pas d'une logique environnementale, mais plutôt d'un choix stratégique, motivé par des gains de productivité ou par l'amélioration des conditions de travail.

### ***Entre fatalisme et alternatives limitées***

#### *Une vision ancrée dans la trajectoire tendancielle*

Comme observé précédemment, la majorité des changements adoptés par les agriculteurs, qu'ils soient situés sur le territoire de la Souffel ou décrits dans d'autres études, relèvent principalement d'ajustements limités et autonomes, mis en œuvre sans transformation structurelle du système agricole ([Kritsjanson et al., 2012](#) ; [Cohn et al., 2017](#)). Ces changements structurels demeurent rares, en grande partie en raison des contraintes imposées par la configuration actuelle du système agricole, notamment les dynamiques de la demande et le fonctionnement des marchés ([Iglesias et al., 2012](#)). Cependant, le recours à ces ajustements traduit déjà une prise de conscience de la nécessité d'un changement plus profond : les conditions climatiques actuelles ne permettent plus de maintenir durablement les modèles productivistes hérités de l'industrialisation de l'agriculture ([Karimi et al., 2020](#)). Ce constat met en lumière une forme d'instabilité du système agricole face aux bouleversements globaux, ressentie par certains agriculteurs qui ont tenté, à leur échelle, de rééquilibrer leur activité en adaptant marginalement leurs pratiques.

Ces ajustements reposent majoritairement sur la capacité d'adaptation du marché, perçue comme la solution la plus flexible à court terme par les agriculteurs du territoire, ou sur des aides financières ponctuelles issues de l'Union européenne ou d'autres politiques agricoles, dans le cadre d'une adaptation dite autonome ([Adger & Vincent, 2005](#)). Néanmoins, ces

<sup>9</sup> Pratique agricole qui vise à faire une coupe très régulière (plusieurs fois par semaine) sur une prairie de légumineuse dans un périmètre géographique retreint proche de la ferme afin d'amener régulièrement de l'herbe fraîche au bétail. Cette coupe destinée au bétail est une alternative à la culture d'engrais verts et permet au bétail de continuer à ingérer de l'herbe fraîche, même lorsque les conditions climatiques s'assèchent.

<sup>10</sup> Un cultivar est une espèce sélectionnée génétiquement pour ses caractéristiques spécifiques.

adaptations restent limitées dans leur portée. À l'inverse, une adaptation planifiée, définie comme un ensemble d'actions stratégiques élaborées par des acteurs institutionnels et experts, capables de les traduire en politiques publiques accessibles à une diversité d'acteurs (*Smit et al., 2000*), s'avèreraient bien plus efficace pour faire face aux effets du changement climatique (*Smit & Pilfsova, 2001 ; Burnham & Ma, 2016*). Or, les discussions menées lors de l'atelier se sont principalement concentrées sur ces ajustements à la marge, plutôt que sur de véritables transformations systémiques, même lorsque les participants étaient invités à réfléchir dans un cadre structuré à cet effet. L'exemple de l'agroforesterie illustre bien cette tension : bien que cette pratique suscite l'intérêt d'une partie des agriculteurs, y compris sur le territoire étudié, son adoption reste limitée. En effet, malgré ses bénéfices reconnus, comme la réduction de l'évapotranspiration et la baisse des températures au sol, bénéfiques tant pour les cultures que pour l'élevage, elle implique des changements profonds, notamment une transformation et une réduction de l'usage des machines agricoles qui est associé à des investissements importants (*Kritsjanson et al., 2012*), ce qui freine, voire empêche la mise en œuvre de ce type d'agriculture.

Au cours de l'atelier, l'ensemble des participants des deux panels s'accordent à reconnaître que le métier d'agriculteur subit et subira des transformations profondes. Toutefois, les trajectoires actuellement observées ne sont souhaitées par aucun des participants. Il est notamment question d'une disparition progressive du métier d'agriculture chef d'entreprise indépendant dans sa forme traditionnelle, au profit de structures de type firmes agro-industrielles, ce qui suscite une inquiétude marquée tant chez les professionnels du secteur que chez les gestionnaires de ressources. Malgré cette prise de conscience, les participants peinent à envisager une rupture avec cette trajectoire prédominante, même à un niveau théorique. Cette forme de sidération ne s'accompagne pas d'une réelle proposition ni d'une planification en vue d'un changement systémique. S'il est admis que planifier des transformations du socio-agro-hydrosystème en profondeur est particulièrement complexe (*Cook & Wei, 2002*), et que l'élaboration d'alternatives à la trajectoire actuelle constitue un défi majeur, y compris pour les parties prenantes directement impliquées dans la transformation du système agricole (*Eriksen et al., 2011*), cela renforce d'autant plus l'intérêt des démarches d'initiation, comme celle mise en œuvre lors de cet atelier. Lors de l'atelier, les participants, et plus particulièrement les agriculteurs, semblent détourner leur attention de cette question en se focalisant sur les choix de consommation des ménages. L'une des principales difficultés soulevées est l'incertitude liée à l'anticipation des futures politiques publiques et des cadres de gouvernance. Cet enjeu, récurrent dans les démarches participatives d'adaptation au changement climatique, freine la capacité d'anticipation et d'engagement dans des trajectoires alternatives (*Karimi et al., 2020*). Ainsi, la poursuite des pratiques actuelles dans un contexte de contrainte climatique génère une forme d'ambivalence chez les agriculteurs : ils doivent sans cesse arbitrer entre la nécessité de maintenir, voire accroître, la productivité agricole (tant pour les cultures que pour l'élevage), et la gestion de ressources de plus en plus limitées, en particulier l'eau et les sols (*Kritsjanson et al., 2012*).

### *Le pari technologique*

Les échanges avec les participants révèlent une forte corrélation entre la technologie et les stratégies d'adaptation au changement climatique, qu'il s'agisse de l'amélioration génétique

des cultures ou de dispositifs de surveillance et d'aide à la décision. C'est un des facteurs les plus cités dans les exercices de prospective participative dans le domaine de l'alimentation et de l'agriculture ([Bourgeois & Sette, 2017](#)). Une observation récurrente est que de nombreux participants se réfèrent à des technologies hypothétiques ou encore inexistantes, misant sur des promesses technologiques dont ni l'efficacité ni même la faisabilité ne sont avérées ([Joly, 2013](#)). Ce type de discours abstrait peut être perçu comme un frein à l'action concrète, contribuant au statu quo ([Lamb et al., 2020](#)).

Par ailleurs, la technologie est parfois perçue comme un levier pour rendre le secteur plus attractif, notamment dans un contexte de pénurie de main-d'œuvre, en suscitant l'intérêt de nouveaux profils sensibles aux approches modernes et innovantes ([Gardezi & Arbuckle, 2018](#)). Lors de l'atelier, les agriculteurs présents adoptent un discours résolument favorable à l'innovation, exprimant une posture "pro-sciences" qui associe progrès technologique et réponses aux défis climatiques. Cette vision contribue à renforcer leur adhésion aux solutions techniques, perçues comme synonymes de modernité et de performance.

Il est à noter que lors de l'atelier, la place de la technologie a été cadrée dans les processus de co-construction de trajectoires futures, pour éviter que cette orientation ne fasse écran à d'autres formes d'adaptation. Il s'agit, d'une part, de ne pas en minimiser l'importance, puisqu'elle constitue un axe central de réflexion pour les participants et, d'autre part, d'en expliciter les limites, en conditionnant son usage à des pratiques compatibles avec la préservation de l'environnement.

### ***L'atelier permet de questionner le changement de pratiques agricoles via la problématique du changement climatique***

#### *Une méthodologie pour initier une réflexion sur le changement de pratiques agricoles*

En résumé, la méthodologie développée à travers cet atelier a permis d'aborder la question du changement climatique, avec pour objectif principal de susciter une réflexion sur l'évolution des pratiques agricoles. Cette approche s'est révélée pertinente au regard des différentes séquences de l'atelier, qui ont chacune contribué à nourrir les échanges et à engager les participants dans une démarche de questionnement.

##### **1) Expériences personnelles et risques perçus**

La première phase de l'atelier invitait les participants à partager leurs expériences du changement climatique, en précisant comment cela avait influencé leurs pratiques et à quels risques ils avaient déjà été confrontés. Cet échange a servi de point d'entrée accessible et mobilisateur, en favorisant l'expression de vécus singuliers et en facilitant l'identification de problématiques spécifiques à chaque profession.

Pour les agriculteurs, cette étape a permis d'échanger autour de petits ajustements déjà testés, qui peuvent inspirer d'autres professionnels et qui soulignent qu'ils ont déjà entamé des mesures d'adaptation. Pour les animateurs, elle a constitué une opportunité de mieux comprendre les enjeux différenciés du changement climatique selon les métiers représentés. Les échanges en binômes, au sein des panels, ont été fluides et riches, ce qui témoigne de l'intérêt des participants et de la pertinence de ce format pour initier une réflexion collective.

## 2) Présentation scientifique

La deuxième phase de l'atelier a reposé sur une présentation de données scientifiques relatives au changement climatique, visant à compléter et à objectiver les perceptions initiales. Elle a permis d'approfondir certains points, tels que la distinction entre climat et météo, la complexité de la production de projections locales, ou encore les scénarios RCP.

Bien que ce type de présentation puisse parfois sembler trop formel dans certains dispositifs participatifs, elle s'est ici révélée essentielle pour structurer les échanges, apporter un cadre de compréhension commun, et renforcer la légitimité des discussions.

## 3) Facteurs d'évolution et perspectives d'avenir

Enfin, la dernière phase de l'atelier s'est concentrée sur les perspectives d'évolution du système agricole face aux effets du changement climatique. Les participants ont été invités à imaginer des trajectoires de transformation, en identifiant des leviers de changement. Cette séquence a mis en évidence à la fois des convergences et des divergences de vision quant à l'avenir de l'agriculture. Toutefois, peu de propositions concrètes ont émergé. L'exercice a surtout révélé une forme de fatalisme partagé, et une difficulté collective à concevoir des alternatives crédibles et mobilisatrices à la trajectoire actuelle. Cela souligne l'importance de renforcer l'accompagnement à la prospective dans les ateliers participatifs, afin d'aider les participants à dépasser les représentations dominantes et à envisager des futurs désirables.

### *L'absence de représentation de la pensée éco-centrée*

Une autre caractéristique importante est que, si le changement climatique constitue une opportunité pour aborder les mesures d'adaptation pour l'agriculture ([Bourgeois & Sette, 2017](#)), il ne favorise pas, dans ce cadre, un véritable dialogue autour de la préservation de la biodiversité et des enjeux environnementaux. Ce constat demeure valable, dans le contexte de cet atelier, même lorsque des acteurs supposés représenter une sensibilité environnementale (comme le syndicat de l'eau ou l'Eurométropole) sont présents.

Un résultat marquant issu de cet atelier est l'absence totale de référence explicite à la biodiversité par l'ensemble des panels. Lorsque la préservation de l'environnement est évoquée, c'est uniquement à travers une approche utilitariste : soit en lien avec les coûts liés à la qualité de l'eau (fonction des polluants détectés), soit à travers l'usage de la rivière à des fins d'irrigation. Ce biais illustre les limites du discours porté par les institutions perçues comme environnementales, qui peinent à faire émerger une vision de l'environnement en tant que bien commun à préserver, indépendamment de ses usages agricoles. Les participants adoptent ainsi une approche résolument anthropocentrale, où l'environnement et la biodiversité sont considérés avant tout comme des ressources au service de l'activité économique et agricole ([Maris, 2014](#)). Dans ce contexte, la rivière de la Souffel est perçue comme « inutile » : d'une part, parce qu'elle ne fournit pas d'eau potable ; d'autre part, en raison de son faible débit, insuffisant pour l'irrigation ([Salles et al., 2016](#)). Toutefois, des tensions latentes apparaissent, notamment au sein du panel animateur, entre des visions plus environnementalistes, qui ne parviennent pas à s'exprimer pleinement, et le discours dominant, largement structuré autour de l'agriculture conventionnelle. Ce phénomène a également été observé dans d'autres ateliers, où les prospectivistes soulignent que, dans des assemblées plurielles, la parole agricole tend à s'imposer (cf. [chapitre 1 section 1](#)), reléguant

les préoccupations environnementales à l'arrière-plan, même lorsqu'elles sont portées par des institutions spécialisées. Dans le cadre de notre atelier, cette situation peut s'expliquer également par le choix délibéré de centrer les échanges sur les enjeux agricoles, au détriment de problématiques environnementales plus larges, ce qui peut générer un sentiment de manque de légitimité de la part des acteurs environnementaux.

## Conclusion

Ce premier atelier avait pour objectif de construire un diagnostic partagé sur les effets actuels et futurs du changement climatique, ainsi que sur les risques qui en découlent, en particulier pour le secteur agricole. Cette analyse s'est en partie appuyée sur les données climatiques et météorologiques disponibles à l'échelle locale. Le travail préparatoire autour de ces données a permis de souligner à la fois leur solidité globale et certaines limites, notamment les biais significatifs observés à l'échelle de la maille fine. En particulier, les modèles climatiques peinent à restituer de manière fiable les dynamiques de précipitations, ce qui soulève des interrogations quant à leur pertinence pour modéliser des systèmes agro-hydrologiques soumis à des contraintes climatiques croissantes. Néanmoins, ces limites méthodologiques n'ont pas été évoquées par les participants lors de l'atelier, suggérant un écart entre l'outillage scientifique mobilisé et les attentes des acteurs locaux quant à ce point. Malgré cela, l'intérêt manifesté par les parties prenantes sur le territoire a permis de réunir un nombre conséquent de participants. Tous ont exprimé une conscience aiguë des bouleversements climatiques, mais aussi sociaux en cours et des risques à venir. Certains, qu'ils soient agriculteurs ou gestionnaires environnementaux, ont d'ailleurs déjà entrepris des ajustements à leurs pratiques. Toutefois, aucune dynamique collective forte ne semble encore émerger pour infléchir significativement la trajectoire actuelle.

Dans ce contexte, les pressions sur les systèmes agricoles, alimentées à la fois par les logiques de l'agriculture conventionnelle et par l'intensification des effets du changement climatique, rendent d'autant plus nécessaire une gestion proactive des ressources et des risques. Les événements extrêmes, tels que les inondations, la grêle ou les glissements de terrain, ont des conséquences directes sur les rendements, la stabilité et la viabilité économique des exploitations. Leur fréquence et leur intensité accrues exigent une anticipation renforcée afin d'adapter les pratiques agricoles, d'accroître leur résilience, et de maintenir un équilibre durable entre production et préservation des écosystèmes ([Miller & Belton, 2014](#) ; [Mukheibir, 2010](#)).

### *Vers une gestion intégrée des risques climatiques ?*

Dans cette perspective, articuler les modes de gestion du changement climatique avec ceux de la gestion environnementale constitue une piste prometteuse pour développer des stratégies d'adaptation collectives, à même de concilier les enjeux agricoles et écologiques. Pourtant, sur le territoire étudié, cette approche reste marginale, ce qui explique que nous essayons d'utiliser le changement climatique comme levier à la propagation de pratiques de gestion environnementale. En effet, les projets sont majoritairement portés de manière isolée par les différentes parties prenantes, avec peu de concertation entre acteurs, comme en témoigne la faible coordination autour des initiatives liées à l'irrigation. Ce manque de

coopération freine le partage des ressources, la cohérence territoriale des actions, et l'émergence de solutions systémiques à la hauteur des enjeux climatiques.

Par ailleurs, la voix environnementaliste demeure peu représentée et défendue dans les échanges. Cette faiblesse remet en question l'idée selon laquelle l'adaptation au changement climatique pourrait naturellement s'aligner avec une gestion écologique du territoire, en particulier sur la question centrale de la ressource en eau. L'analyse de cet atelier montre donc qu'une approche purement adaptative, non accompagnée d'une vision environnementale intégrée, risque de reproduire des logiques sectorielles peu efficaces à long terme.

Ces constats soulignent la nécessité de mieux cadrer l'atelier consacré à la co-construction d'images du territoire à l'horizon 2070 pour y intégrer plus explicitement les enjeux environnementaux, encourager une approche plus systémique, et orienter les échanges vers des formes de gestion territoriale véritablement durables.

## Références

- Adger, W. N., & Vincent, K. (2005). Uncertainty in adaptive capacity. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(4), 399–410.
- Adger, W.N., S. Agrawala, M.M.Q. Mirza, C. Conde, K. O'Brien, J. Pulhin, R. Pulwarty, B. Smit and K. Takahashi. (2007). Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 717-743.
- Adger, W. N., Dessai, S., Goulden, M., Hulme, M., Lorenzoni, I., Nelson, D. R. & Wreford, A. (2009). Are there social limits to adaptation to climate change?. *Climatic change*, 93, 335-354.
- Agrawal, A. (2009). Local institutions and adaptation to climate change. In R. Mearns & A. Norton (Eds.), *The social dimensions of climate change: Equity and vulnerability in a warming world* (pp. 173–197). Washington, DC: World Bank Publications.
- Akompab, D. A., Bi, P., Williams, S., Saniotis, A., Walker, I. A., & Augoustinos, M. (2013). Engaging stakeholders in an adaptation process: Governance and institutional arrangements in health-health policy development in Adelaide, Australia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18, 1001-1018.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2013). The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*.
- Below, T., Artner, A., Siebert, R., & Sieber, S. (2010). Micro-level practices to adapt to climate change for African small-scale farmers: A review of selected literature.
- Billah, M. M., Sarker, M. A., Miah, M. A. M., & Kabir, K. H. (2015). Adaptation of farming practices by the smallholder farmers in response to climate change. *Journal of Agricultural Extension and Rural Development*, 7(2), 33-40.
- Blackstock, K. L., Kelly, G. J., & Horsey, B. L. (2007). Developing and applying a framework to evaluate participatory research for sustainability. *Ecological economics*, 60(4), 726-742.
- Blennow, K., Persson, J., Tome, M., & Hanewinkel, M. (2012). Climate change: believing and seeing implies adapting. *PloS one*, 7(11), e50182.
- Boé, J., Somot, S., Corre, L., & Nabat, P. (2020). Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Climate Dynamics*, 54, 2981-3002.
- Bosomworth, K., Leith, P., Harwood, A., & Wallis, P. J. (2017). What's the problem in adaptation pathways planning? The potential of a diagnostic problem-structuring approach. *Environmental Science & Policy*, 76, 23-28.
- Bourgeois, R., & Sette, C. (2017). The state of foresight in food and agriculture: Challenges for impact and participation. *Futures*, 93, 115-131.
- Burnham, M., & Ma, Z. (2016). Linking smallholder farmer climate change adaptation decisions to development. *Climate and Development*, 8(4), 289-311.
- Chervenkov, H., & Slavov, K. (2021). ETCCDI climate indices for assessment of the recent climate over southeast Europe. In *Advances in High Performance Computing: Results of the International Conference on "High Performance Computing" Borovets, Bulgaria, 2019* (pp. 398-412). Springer International Publishing.
- Cohn, A. S., Newton, P., Gil, J. D., Kuhl, L., Samberg, L., Ricciardi, V. & Northrop, S. (2017). Smallholder agriculture and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 42(1), 347-375.
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., Therond, O. (2015). The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology* (206), 55-68
- Cook, S., & Wei, H. (2002). The anomalous nature of development success: A case study from China. *Development*, 45, 76–80.

- Coppus, R., & Imeson, A. C. (2002). Extreme events controlling erosion and sediment transport in a semi-arid sub-Andean valley. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(13), 1365-1375.
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., & Martin, E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of glaciology*, 18, 65-71.
- Eriksen, S., Aldunce, P., Bahnipati, C. S., Martins, R. D., Molefe, J. I., Mhemachena, C. & Ulsrud, K. (2011). When not every response to climate change is a good one: Identifying principles for sustainable adaptation. *Climate and Development*, 3, 7–20.
- Gardezi, M., & Arbuckle, J. G. (2020). Techno-optimism and farmers' attitudes toward climate change adaptation. *Environment and Behavior*, 52(1), 82-105.
- Garin, P., Rollin, D., Maton, L., Rinaudo, J. D., Ferroudji, A. R., & Caballero, Y. (2015). Prospective participative sur l'agriculture du Roussillon face au changement climatique. *Agronomie, environnement & sociétés*, 5(1), 57-66.
- Girard, C. (2015). Integrating top-down and bottom-up approaches to design a cost-effective and equitable programme of measures for adaptation of a river basin to global change (*Doctoral dissertation*, Montpellier SupAgro; Universidad politécnica de Valencia (Espagne)).
- Gramberger, M., Zellmer, K., Kok, K., & Metzger, M. J. (2015). Stakeholder integrated research (STIR): a new approach tested in climate change adaptation research. *Climatic change*, 128, 201-214.
- Grothmann, T., & Patt, A. (2005). Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change. *Global environmental change*, 15(3), 199-213.
- Gumbel, E. J. (1935). Les valeurs extrêmes des distributions statistiques. In *Annales de l'institut Henri Poincaré* (Vol. 5, No. 2, pp. 115-158).
- Gutiérrez, J. M., Maraun, D., Widmann, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, R. & Pagé, C. (2019). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International journal of climatology*, 39(9), 3750-3785.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E. & Viennot, P. (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6).
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate dynamics*, 37, 407-418.
- Herrera, S., Soares, P. M., Cardoso, R. M., & Gutiérrez, J. M. (2020). Evaluation of the EURO-CORDEX regional climate models over the Iberian Peninsula: Observational uncertainty analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(12).
- Iglesias, A., Quiroga, S., Moneo, M., & Garrote, L. (2012). From climate change impacts to the development of adaptation strategies: challenges for agriculture in Europe. *Climatic Change*, 112, 143-168.
- IPCC. (2023). Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M. & Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14, 563-578.
- Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S., Katragkou, E., Anders, I., Belda, M. & Wulfmeyer, V. (2020). Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional environmental change*, 20, 1-20.
- Jena, P. R. (2024). Technological Solutions for Sustainable Agriculture. *Ecology, Economy and Society—the INSEE Journal*, 7(1), 171-175.
- Johnson, N., Lilja, N., Ashby, J. A., & Garcia, J. A. (2004, August). The practice of participatory research and gender analysis in natural resource management. In *Natural Resources Forum* (Vol. 28, No. 3, pp. 189-200). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

- Joly, P. B. (2013). Chapitre 8. À propos de l'Économie des promesses techno-scientifiques. In *La Recherche et l'Innovation en France* (pp. 231-255). Odile Jacob.
- Kalfagianni, A., & Kuik, O. (2017). Seeking optimality in climate change agri-food policies: stakeholder perspectives from Western Europe. *Climate Policy*, 17(sup1), S72-S92.
- Karimi, V., Karami, E., Karami, S., & Keshavarz, M. (2021). Adaptation to climate change through agricultural paradigm shift. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 5465-5485.
- Knox, J., Daccache, A., Hess, T., & Haro, D. (2016). Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe. *Environmental Research Letters*, 11(11), 113004.
- Kristjanson, P., Neufeldt, H., Gassner, A., Mango, J., Kyazze, F. B., Desta, S. & Coe, R. (2012). Are food insecure smallholder households making changes in their farming practices? Evidence from East Africa. *Food Security*, 4, 381-397.
- Lamb, W. F., Mattioli, G., Levi, S., Roberts, J. T., Capstick, S., Creutzig, F. & Steinberger, J. K. (2020). Discourses of climate delay. *Global Sustainability*, 3, e17.
- Laurantin, O. (2008, March). Antilope: Hourly rainfall analysis merging radar and rain gauge data. In *Proceedings of the international symposium on weather radar and hydrology* (pp. 2-8).
- Ledger, M. E., & Milner, A. M. (2015). Extreme events in running waters. *Freshwater Biology*, 60(12), 2455-2460.
- Le Moigne, P. (2002). Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Note de centre GMME, Météo-France, 1-30.
- MacMillan, T., & Benton, T. G. (2014). Agriculture: Engage farmers in research. *Nature*, 509(7498), 25-27.
- Malagó, A., Bouraoui, F., Vigiak, O., Grizzetti, B., & Pastori, M. (2017). Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Science of the Total Environment*, 603, 196-218.
- Maris V. (2014). Nature à vendre. Les limites des services écosystémiques. Editions QUAE
- Marson, P., Corre, L., Soubeyroux, J. M., Sauquet, E., Robin, Y., Vrac, M., & Dubois, C. (2024). *Explore2-Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées* (Doctoral dissertation, METEO FRANCE; INRAE; Institut Pierre-Simon Laplace).
- Mermet, L., Billé, R., Leroy, M., Narcy, J. B., & Poux, X. (2005). L'analyse stratégique de la gestion environnementale: un cadre théorique pour penser l'efficacité en matière d'environnement. *Natures sciences sociétés*, 13(2), 127-137.
- Mertz, O., Mbow, C., Østergaard Nielsen, J., Maiga, A., Diallo, D., Reenberg, A., ... Dabi, D. (2010). Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa. *Ecology and Society*, 15(4), 25.
- Miller, K. A., & Belton, V. (2014). Water resource management and climate change adaptation: a holistic and multiple criteria perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19, 289-308.
- Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the national academy of sciences*, 107(51), 22026-22031.
- Mukheibir, P. (2010). Water access, water scarcity, and climate change. *Environmental management*, 45, 1027-1039.
- Naess, L. O., Bang, G., Eriksen, S., & Vevatne, J. (2005). Institutional adaptation to climate change: flood responses at the municipal level in Norway. *Global Environmental Change*, 15(2), 125-138.
- Nalau, J., & Cobb, G. (2022). The strengths and weaknesses of future visioning approaches for climate change adaptation: A review. *Global Environmental Change*, 74, 102527.
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., & Jouzel, J. (2014). Scénarios régionalisés: édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. *Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle*, 4.
- Pérez-Cutillas, P., Banos Paez, P., & Banos-González, I. (2020). Variability of Water Balance under Climate Change Scenarios. Implications for Sustainability in the Rhône River Basin. *Sustainability*, 12(16), 6402.

- Pidgeon, N., & Fischhoff, B. (2013). The role of social and decision sciences in communicating uncertain climate risks. In *Effective risk communication* (pp. 319-342). Routledge.
- Preston, B. L., Mustelin, J., & Maloney, M. C. (2015). Climate adaptation heuristics and the science/policy divide. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20, 467-497.
- Pulido-Velazquez, M., Marcos-Garcia, P., Girard, C., Sanchis-Ibor, C., Martinez-Capel, F., García-Prats, A. & Rinaudo, J. D. (2022). A top-down meets bottom-up approach for climate change adaptation in water resource systems. In *Climate adaptation modelling* (pp. 149-157). Cham: Springer International Publishing.
- Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M. & Morel, S. (2008). Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of applied meteorology and climatology*, 47(1), 92-107.
- Quintana-Seguí, P., Turco, M., Herrera, S., & Miguez-Macho, G. (2017). Validation of a new SAFRAN-based gridded precipitation product for Spain and comparisons to Spain02 and ERA-Interim. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4), 2187-2201.
- Rivière, A., Ladet, D., Thomas, W., Le Breton, G., Ducharme, A., & Oudin, L. (2021). *Projections des températures de l'eau de la Seine à Paris à l'horizon 2100* (Doctoral dissertation, Mines Paris-PSL).
- Robin, Y., Corre, L., Marson, P., Bernus, S., Vrac, M., Thao, S. (2023). Projections climatiques régionalisées : correction de biais et changements futurs. Rapport d'avancement, 62 pages
- Rounsevell, M. D., & Metzger, M. J. (2010). Developing qualitative scenario storylines for environmental change assessment. *Wiley interdisciplinary reviews: climate change*, 1(4), 606-619.
- Salles, J. M., Ezzine, D. B. D., Julliard, R., Mongruel, R., Quétier, F., & Sarrazin, F. (2016). Biodiversité utile versus nature inutile: argumentaire écologique et économique. *Valeurs de la biodiversité et services écosystémiques*.
- Sauquet, E., Chatel, T., & Martin, E. (2019). *Vers l'élaboration de nouvelles projections hydro-climatiques pour les stratégies d'adaptation au niveau des bassins versants français* (Doctoral dissertation, Inrae; Irstea).
- Scherr, S. J., Shames, S., & Friedman, R. (2012). From climate-smart agriculture to climate-smart landscapes. *Agriculture & Food Security*, 1, 1-15.
- Schwingshackl, C., Davin, E. L., Hirschi, M., Sørland, S. L., Wartenburger, R., & Seneviratne, S. I. (2019). Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO<sub>2</sub> response. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114019.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D., ... & Allan, R. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate.
- Sippel, S., & Otto, F. E. (2014). Beyond climatological extremes-assessing how the odds of hydrometeorological extreme events in South-East Europe change in a warming climate. *Climatic Change*, 125, 381-398.
- Smit, B., Burton, I., Klein, R. J., & Wandel, J. (2000). *An anatomy of adaptation to climate change and variability* (pp. 223-251). Springer Netherlands.
- Smit, B., & Pilifosova, A. (2001). Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. In J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken, & K. S. White (Eds.), *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability – contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 877–912). Cambridge: Cambridge University Press.
- Smith, G. (2017). Concevoir la démocratie pour le long terme: innovation institutionnelle et changement climatique. *La Pensée écologique*, 1(1), h.
- Soubeyroux, J. M., Martin, E., Franchisteguy, L., Habets, F., Noilhan, J., Baillon, M. & Morel, S. (2008). Safran-Isba-Modcou (SIM): Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études. *La Météorologie*, (63), PP-40.
- Stringer, L. C., & Reed, M. S. (2007). Land degradation assessment in southern Africa: integrating local and scientific knowledge bases. *Land Degradation & Development*, 18(1), 99-116.

Tippett, J., Handley, J. F., & Ravetz, J. (2007). Meeting the challenges of sustainable development—A conceptual appraisal of a new methodology for participatory ecological planning. *Progress in planning*, 67(1), 9-98.

Truelove H. B., Carrico A. R., Thabrew L. (2015). A socio-psychological model for analyzing climate change adaptation: A case study of Sri Lankan paddy farmers. *Global Environmental Change*, 31, 85-97. Crossref.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., & Lafaysse, M. (2017). The method ADAMONT v1. 0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geoscientific Model Development*, 10(11), 4257-4283.

von Gehren, P., Bomers, S., Tripolt, T., Söllinger, J., Prat, N., Redondo, B., ... & Ribarits, A. (2023). Farmers feel the climate change: Variety choice as an adaptation strategy of European potato farmers. *Climate*, 11(9), 189.

Werners, S. E., Wise, R. M., Butler, J. R., Totin, E., & Vincent, K. (2021). Adaptation pathways: A review of approaches and a learning framework. *Environmental Science & Policy*, 116, 266-275.

Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological sciences journal*, 54(1), 101-123.

Willson, B., & Roderick, S. (2018). Delivering solutions: Engaging farmers and land holders in the climate change debate. *Handbook of Climate Change Communication: Vol. 2: Practice of Climate Change Communication*, 263-275.

Wolf, J., Allice, I., & Bell, T. (2013). Values, climate change, and implications for adaptation: Evidence from two communities in Labrador, Canada. *Global Environmental Change*, 23(2), 548-562.

Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A. & Olesen, J. E. (2022). Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy*, 138, 126516.



## **Chapitre 4 : Des dires d'acteurs aux données d'entrée de modèles : traçabilité et cohérence des scénarios qualitatifs et quantitatifs dans un exercice de prospective participative.**

### Introduction du chapitre

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour passer des dires d'acteurs recueillis lors de l'atelier de production d'image à l'horizon 2070, d'abord à des récits puis à des données mobilisables pour la modélisation. Deux ateliers distincts avaient été organisés, chacun réunissant un des deux panels (i.e. agriculteurs et animateurs), avec pour objectif de produire une image désirable de la Souffel en 2070, en respectant quatre contraintes normatives : une agriculture moins polluante, plus résiliente face au changement climatique, économiquement viable et désirable professionnellement. Ces contraintes devaient être envisagées dans le cadre spécifique d'une projection à l'horizon 2070, ce qui suppose de nombreux changements, notamment sur la viabilité économique et l'attractivité professionnelle, fortement dépendantes des futurs envisagés. Les propos des participants ont été restitués sous forme de verbatims, grâce à une prise de notes systématique au sein de chaque sous-groupe, chacun ayant élaboré une image distincte. Ce chapitre est intégré dans le manuscrit de thèse sous forme d'un article en anglais qui repose sur un seul des quatre exemples produits au cours de ce travail de thèse. Les trois autres récits ainsi que les cartes associées sont présentés après l'article.

L'article vise à répondre à la question de recherche suivante issue de ce travail de thèse :

- Dans le cadre d'une prospective participative, quelle méthodologie adopter pour produire un travail à la fois fidèle, cohérent et robuste pour transformer les dires d'acteurs en images puis en données d'entrées de modèles agro-hydrologiques ?

Les résultats présentés dans ce chapitre, ainsi que dans l'article associé, s'appuient sur les propos recueillis lors du deuxième atelier, mené avec les mêmes participants que ceux du premier atelier consacré à la perception du changement climatique (cf. [chapitre 3](#)). Comme pour le premier atelier, deux sessions ont été organisées : l'une avec le panel d'agriculteurs, l'autre avec le panel d'animateurs. Pour animer et structurer ces échanges, nous avons de nouveau fait appel à Benoît Labbouz, déjà impliqué lors du premier atelier. Ce second atelier avait pour objectif de co-construire des représentations de l'agro-hydrosystème à l'horizon 2070. Afin de respecter les contraintes de temps, des consignes précises ont été données, orientant les participants vers la production d'images normatives ([Julien et al., 1975](#)), (cf. [chapitre 1, section 1.4](#)). La majorité des participants ayant pris part au premier atelier étaient également présents au second : 8 sur 10 pour le panel des animateurs, et 2 sur 3 pour celui des agriculteurs. La baisse de participation chez ces derniers s'explique par leur difficulté à prévoir leur disponibilité, en raison de la forte variabilité climatique affectant leur activité.

L'atelier a débuté par la répartition des participants en petits groupes de trois à quatre personnes. Les étapes de travail se sont déroulées comme suit :

### **Introduction (5')**

- Présentation du projet
- Objectifs et séquences de l'atelier

### **Séquence 1 : Construction d'une image de l'agriculture du BV en 2070 (45')**

Quelle agriculture sur le BV en 2070 qui répondrait aux 4 critères suivants :

- 1/ résiliente au CC
- 2/ moins polluante
- 3/ désirable professionnellement
- 4/ viable économiquement → Supports distribués (Annexe 4)

### **Séquence 2 : Conditions de faisabilité des images (45')**

Consolidation du contexte socio-politique dans lequel l'agriculture s'insère :  
conditions de réalisation de ce futur alternatif  
Supports distribués (Annexe 5)

### **PAUSE (15')**

### **Séquence 3 : Présentation et discussion des images (50')**

Présentation des images construits (20')

Discussion de chaque image (30') :

- comment (et pourquoi) chaque objectif normatif est « traité » dans l'image ?
- quels points d'amélioration des images ? Quelle comparaison entre les images ?

### **Conclusion et discussion générale (20')**

Discussion collective sur les suites, avec prise de parole libre

La littérature propose une grande diversité de méthodologies de production de scénarios, chacune poursuivant des objectifs propres, mais toutes cherchant à garantir la cohérence et la robustesse des scénarios produits. Dans ce travail, la priorité a été donnée à l'intégration maximale des discours et idées formulés par les participants lors des ateliers. Cela a posé une difficulté méthodologique quant à la structuration de récits puis de jeux de données cohérents et exploitables à partir d'idées développées dans un laps de temps restreint. Cette contrainte temporelle, qui est une composante de l'approche frugale, constitue un enjeu central de ce travail, car elle complexifie la traduction des dires d'acteurs en récits et en éléments mobilisables pour la modélisation. La transparence méthodologique est assurée ici par un principe de traçabilité : l'article retrace en détail les étapes de transformation, depuis les dires d'acteurs jusqu'à la production du récit, puis à l'élaboration des données d'entrée pour la modélisation.

La mise en récit s'appuie sur un travail d'analyse bibliographique réalisé en amont par Gaétan Pénin lors de son stage de master 2, que j'ai co-encadré. Ce travail, fondé sur l'analyse de plus de 36 scénarios de prospective agro-hydrologiques sous forçage climatique, a permis d'identifier un ensemble de variables clés dont la caractérisation est indispensable à la construction d'une image future cohérente. Ces variables ont été mobilisées à différentes étapes de l'élaboration du récit et sont détaillées dans l'article.

## **From statements to input data model: traceability and consistency of qualitative and quantitative scenarios in a participatory foresight exercise**

**Authors :** WEIDENFELD Lou<sup>1</sup>, BARBIER Rémi<sup>2</sup>, FERNANDEZ Sara<sup>3</sup> & PAYRAUDEAU Sylvain<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES, UMR 7063, Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES) Strasbourg F-67084, France

<sup>2</sup> : Sociétés, Acteurs, Gouvernement en Europe (SAGE, UMR MA 8101, Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, INRAE, UHA), F-67000 Strasbourg, France

<sup>3</sup> : Agroécologie-Innovations-Territoires (AGIR, UMR ????, INRAE, INP-Toulouse, ENSFEA), F-Toulouse, France

### **Abstract**

In scenario development, many studies aim to clarify how robust and coherent scenarios are constructed, but often rely on methodological descriptions and theoretical frameworks. This paper seeks to offer a more transparent account by illustrating through an example the full process of translating stakeholders' statements into final storylines and model inputs. This analysis is based on a participatory workshop conducted in a polluted agricultural catchment in Alsace, France (120 km<sup>2</sup>), involving non-mixed panels of stakeholders (i.e., farmers, public officials, water managers, and local authorities). The workshop aimed to co-design desirable scenarios for farming systems and practices in the catchment in 2070 that are less polluting, more resilient to climate change, and adapted to local conditions. Both the workshop and modelling were conducted under frugality constraints (i.e., short sessions, use of existing models and databases) for reasons of reproducibility, emphasizing the substantial effort required to transform stakeholders' inputs into consistent outputs. The participatory nature of the process requires a high level of transparency. This paper details the process of modifying stakeholders' contributions to develop a robust and coherent storyline, and to translate this envisioned future into inputs for conceptual agro-hydrological modelling.

**Key words:** participatory workshop; foresight; consistency; traceability; storyline; input modelling.

### **1. Introduction**

For decades, **storylines**, the written part of the story, and **scenarios**, which include both the storyline and modelling inputs and outputs, have been widely used to explore potential and contrasted medium and long-term socio-environmental trajectories (Alcamo, 2008). Despite growing efforts to integrate scenarios with modelling, key challenges remain, especially due to multiple uncertainties from different origins (Elsawah et al., 2020b). Transparency in designing storylines and setting model input data remains a major concern. Carlsen et al. (2017) highlighted a lack of clarity between stakeholders' narratives, transcribed group discussions from participatory workshops, and the resulting scenario inputs, particularly in climate change studies. Similarly, Elsawah et al. (2020a) noted gaps in ensuring consistency between storylines and models in stakeholder-based research. In this study, consistency refers to the internal logic of an imagined world that supports its underlying assumptions,

consistency being a function of the propositions themselves. Tapinos (2012) underscored the lack of research on best practices for narrative construction. Growing literature calls for systematic methods to translate stakeholders' statements into storylines (van Asselt & van't Klooster, 2012; Kosow, 2015; Elsawah et al., 2020a), including practical scenario-building guidelines (van't Klooster et al., 2024) and methods for translating narratives into model inputs (Garb et al., 2008; Elsawah et al., 2020b).

Integrating qualitative and quantitative methods with stakeholder participation has become a popular approach in foresight studies, (Delmotte et al., 2017; Allain et al., 2020; Volkery et al., 2008), particularly in energy sector (Ernst et al., 2018; Weimer-Jehle et al., 2016; Trutnevye et al., 2014; Fortes et al., 2015). However, scholars often fail to explicitly and transparently explain how stakeholders' discourses are translated into scenarios and input data for modelling while insisting more on the results of their research (Weimer-Jehle et al., 2020; Kok et al., 2011; Ernst et al., 2018). Scenario-building approaches vary, ranging from iterative stakeholder–researcher exchanges, as in the PRELUDE project (Volkery et al., 2008), to scenario improvisation, which adapts existing storylines to local contexts, reducing time demands but potentially limiting flexibility (Cairns et al., 2016). Local actors in land and water governance often lack time to engage in future studies that could support adaptation to ongoing or future changes, particularly at local scale. Reducing the time required to build consistent scenarios and translate them into model inputs is a key challenge. This paper addresses that challenge through a “frugality” approach, aiming for efficiency and minimal time investment by leveraging existing tools. At the same time, in time-constrained contexts (Tapinos, 2012), the scenario team plays a crucial role (Parson, 2008). Deploying methods that increase transparency in how narratives are turned into scenarios is a need in literature (Kosow, 2015) appears to be an effective mean to grapple with inherent biases, uncertainties, and potential discontinuities encountered in the process (Jahel et al., 2023).

The frugal approach adopted in this study combines elements of the standard methodology used in scenario-building, particularly the translation of stakeholder input into narrative form. However, unlike traditional scenario frameworks, which typically include both a synchronic dimension (a snapshot of the system at a given time) and a diachronic dimension (its evolution over time) as described by Alcamo (2008), this study focuses solely on the synchronic dimension. Although incorporating both dimensions is important for fully understanding the scenario and guiding public policy recommendations, this paper limits itself to presenting the synchronic perspective: a static representation of the territory in the year 2070. Throughout this paper, this static representation is referred to as the **image**.

A range of methods exists to translate narratives into storylines, with a focus on ensuring scenario consistency. Qualitative approaches include selecting and clustering variables, such as the intuitive logics method, which assesses variables by probability to occur, using statistical algorithms to appraise future trends (Wright et al., 2013), and scenario axes techniques (Van't Klooster et al., 2006). The cross-impact balance (CIB) method (Weimer-Jehle et al., 2016) improve consistency by identifying key system descriptors and their variants, evaluating their interrelationships in a matrix to characterise future states. While CIB clarifies matrix construction, it lacks transparency on storyline development and potential biases (Trutnevye et al., 2014). To expand beyond the CIB method, the futures wheel method (Bengston, 2016; Ernst et al., 2018) identifies social-ecological changes during the scenario development to

emphasize causal links, through a qualitative approach, unlike algorithm-based causal loop diagrams (Kok et al., 2006; Jetter & Kok, 2014) or fuzzy cognitive maps (Van Vliet et al., 2010), which represent simplified systems and can be software-generated (Coletta et al., 2021). Iteratively developing storylines among stakeholders through role-playing interactions may introduce biases and require extensive time; however, leveraging conflict, as proposed by Wright and Cairns (2011), can foster diverse perspectives and constructive dialogue.

Numerous studies explore methods for translating narratives or storylines into quantitative models to assess the potential results of the scenarios (Mallampalli et al., 2016). Alcamo (2008) deployed the pioneering 'story and simulation' approach based on expert judgments, stakeholder input and literature review. Volkery et al. (2008) suggested involving stakeholders in quantifying driving forces and translating these results based on other trajectories from another scenario. The Realising Transition Pathways / Transition Pathways (TP/RTP) methodology framework involves iterative stages, including extracting quantification from stakeholders' statements, validating through expert judgments, and refining based on model outputs (Robertson et al., 2017), yet a comprehensive validation of the inputs remains elusive. The development of integrated assessment models (IAM) facilitates transitioning from qualitative storylines to quantitative forms, especially in the economic field (Beck, 2018). For instance, Delmotte et al. (2017) employed a bio-economic IAM to produce various future land-use scenarios guided by stakeholder strategies, followed by an evaluation of socio-economic and environmental indicators to facilitate scenario discussion. Trutnevye et al. (2014) advocate for linking storylines to multiple models for comprehensive scenario evaluation, though they don't focus on the challenges linked to model flexibility. All this literature remains rather silent about the accurate translation procedure deployed.

Literature on theoretical aspects related to the significance of transparent procedures to produce robust, i.e. that the structure remains well-founded and justifiable even when faced with new assumptions unforeseen by the authors, qualitative storylines and quantitative inputs for modelling remains rather scarce. Kosow (2015) is one of the few scholars who tackles this issue. Traceability relies on understanding rejected alternatives, logic behind chosen trajectories, process pathways, while consistency involves scenario alignment with assumptions, other existing scenarios, narrative-to-input translation, and external variables (i.e., nitrogen availability, water availability, planetary boundaries, etc.). Mehryar et al. (2019), attempted global approaches combining fuzzy cognitive maps and agent-based models, to ameliorate traceability. The approach, however, requires building new models, and it is thus not able to meet the frugality principle approached in this research.

This paper is based on the result of a study that aimed at engaging local stakeholders in an agricultural catchment (Souffel, North East France) to promote sustainable agricultural practices that minimise impacts on water quality and quantity under projected climate change scenarios through 2070. The primary objective of this paper is to develop a transparent process for scenario development that emerges from participatory workshops and input construction by the scenario team. Stakeholder contributions were translated into both narrative storylines and parameters for the agro-hydrological model MAELIA (Tribouillois et al., 2022), supporting more refined engagement processes (Cairns et al., 2013; van Bruggen et al., 2019). The goal was to actively integrate participants into the storyline generation. Although this process is widely acknowledged in the literature, it is often underexplored and

still relies heavily on expert judgment ([van't Klooster et al., 2024](#)). The study also explored the integration of qualitative and quantitative methods ([Kosow, 2016](#)) within integrated assessment models ([Geels et al., 2016; Delmotte et al., 2017](#)), with a particular focus on ensuring methodological consistency ([Morgan, 2012](#)). The method seeks to illustrate typical decision points during the transformation of narratives into inputs, while also highlighting the reciprocal influence between storylines and input data. By incorporating the constraint of frugality, this paper seeks to unpack the complexity of this underexplored area, while streamlining the iterative process between foresight teams and stakeholders. It also provides a practical guide, using a specific example derived from transcribed workshop conversations. Finally, the discussion critically examines the balance between preserving the integrity of stakeholders' narratives and ensuring coherence in both storylines and model inputs, as well as reflections about scenario development boundaries.

## 2. Materials and methods

This study was conducted between 2021 and 2023 in Alsace, located in the North East of France, near Strasbourg (Souffel catchment outlet coordinates:  $48^{\circ} 38' 20''$  N,  $7^{\circ} 44' 35''$  E). The image-building workshop was part of a wider project to support changes in farming practices in order to minimize pollution in rivers. This workshop followed a previous session with the same participants, which focused on climate change as a driver of changes in agricultural practices. During the first session, we discussed the necessity to adapt practices in response to climate change at the local scale (+2.2°C since 1950, MétéoFrance SAFRAN dataset) and explored changes that have already occurred in their working methods. This initial work aimed to establish a shared diagnosis of the situation which was directly used in the image-building workshop. The article focuses on one of the four narratives developed during the workshop, selected as a representative example to illustrate the typical decision points and methodological steps required for translating qualitative scenarios into model inputs.

Following a brief introduction to the case study area, we present an overview of the workshop methodology, accompanied by a concise description of the agro-hydrologic model, MAELIA, used to simulate long-term images and frame the construction of input modelling. The final part of the section focuses on a brief presentation of an analysis grid that synthesizes the key variables needed to build an agro-hydrological forecast under climate forcing, serving as a tool to create consistent storylines from fragments of narratives that remain confused.

### 2.1 Case study area

The study area is a 120 km<sup>2</sup> catchment situated in northeastern France (Figure 46). This catchment benefits from the high agronomic potential of its loessic soils, which supports the intensive cultivation of maize, wheat, and sugar beet. These soils are characterised by a water storage capacity ranging from 75 to 200 mm, contributing significantly to the region's agricultural productivity with relatively low irrigation requirements. However, over the past 15 years, the climate has shifted towards drier and hotter summer (with daily averages exceeding 27°C for several days, according to MétéoFrance, SAFRAN data) and intense, localised rainfall in autumn and spring, making irrigation increasingly essential.

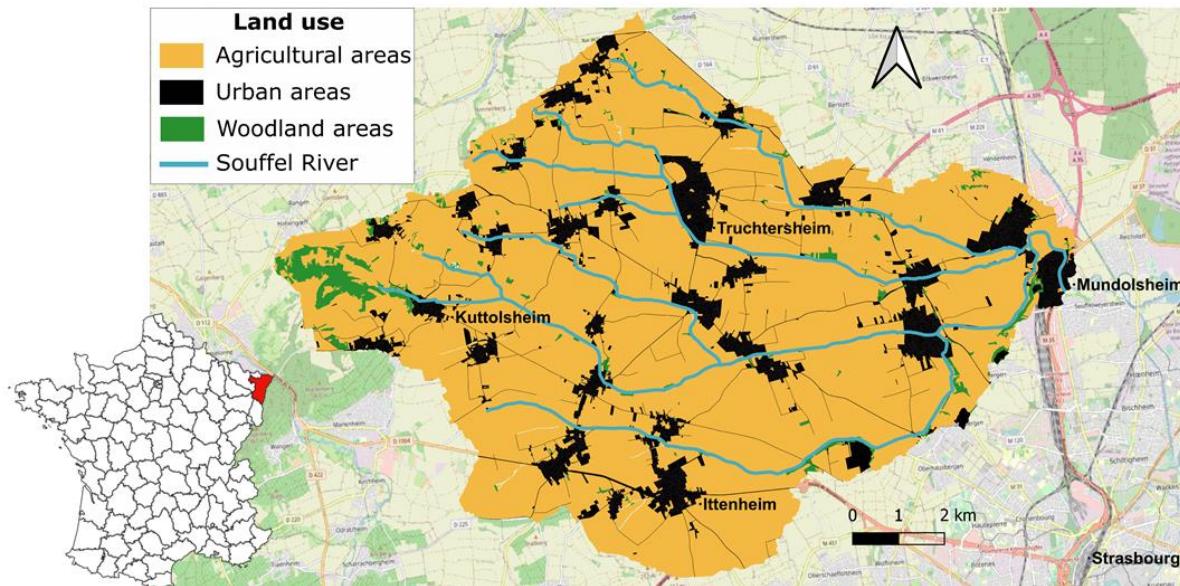


Figure 46. Location of the Souffel catchment area (France).

Compared to neighbouring rivers, the Souffel River exhibits significantly lower average area-normalised daily discharges ( $0.828 \pm 0.986 \text{ m}^3/\text{day}$  for 2019–2022), with values an order of magnitude lower than those of adjacent rivers. Consequently, the Souffel has a limited capacity to dilute pollutant loads, making it one of the most polluted rivers in Europe. This contamination is predominantly driven by pesticides and nitrogen from fertilisers, a consequence of intensive agricultural practices in the catchment. Moreover, the proximity to the city of Strasbourg has resulted in substantial land use changes, with urban expansion increasingly encroaching on agricultural land, leading to a 484% increase in urban area between 1956 to 2018.

## 2.2 Image-building workshop proceedings

The image-building workshop aimed to establish various desirable futures for the territory in 2070 using normative scenarios (Julien et al., 1975; Rounsevell et Metzger, 2010). This workshop focused on agricultural practices, including crop types, farm size, the number of farmers, and the use of fertilisers, pesticides, and water, while assuming a stable farmland area. Two separate image-building workshops were conducted with distinct stakeholder groups. The first, held exclusively for farmers (4 participants), provided a space for open and unrestricted discussion (Rinaudo et al., 2013). The second workshop brought together a diverse group of public-sector advisors and experts from institutions such as the water union and the chamber of agriculture, focusing on water and agricultural issues (10 participants). To maintain a frugal approach, each workshop was limited to three hours, making the accuracy and fidelity of communication particularly critical. This time constraint is a common challenge when developing consistent scenarios without an iterative process (Cairns et al., 2016; Carlsson et al., 2015) which required careful planning. This frugality was further supported by expert judgment aids including scholars and local expert (Walton et al., 2019). The workshops were structured around four key criteria for agriculture in 2070: (i) Resilience to climate change; (ii) Reduced pollutant emissions compared to current levels; (iii) Professional desirability and (iv) Economic viability.

The three-hour workshop was structured into several phases, beginning with an introduction that included a brief recap of the hydro-climatic context covered in the first session, followed by an overview of the current state of the territory (i.e., its landscape, dominant crops, and farming structures). This was followed by two group work sequences, with participants divided into smaller groups of three to four. The first sequence, titled "*Which kind of agriculture in 2070 for the territory*" (45 minutes), focused on discussing the implication of each criterion and exploring the projected state of agriculture in 2070. The workshop materials comprised two comprehensive maps: one illustrating land use, water storage, and the water table, and the other depicting major crops, their distribution, and farm types. Additionally, participants were given with a blank territorial map, outlining boundaries, urban areas, and riverbeds, as well as an empty table for recording key attributes of the envisioned future. The second phase, "*Image feasibility*" (45 minutes), focused on the socio-political context shaping agriculture in 2070. During this phase, participants were encouraged to consider the structural changes necessary to achieve their vision and identify critical events that may drive transformation. Supporting materials included a blank table for documenting 2070 regional characteristics and a timeline for mapping significant developments. Following a break, the final segment of the workshop (50 minutes) involved group presentations and discussions, focusing on identifying similarities and differences across images and evaluating how each approach addressed the pre-established criteria.

### 2.3 Description of the model inputs

Maelia is a semi-distributed within the IAM. It is an multi agent-based model (Multi-Agents for Environmental norms Impact Assessment) designed to simulate interactions between agricultural practices and water management under climatic constraints ([Tribouillois et al., 2022](#)). The model integrates nitrogen, carbon, and water cycles, applying equations at the field scale before aggregated them up to the catchment level.

MAELIA requires a set of input data, summarised as follows in Table 10:

*Table 10. Main data required to use the agricultural module of MAELIA.*

Data	Examples	Sources
Climatic and meteorological	Daily temperature, rainfall...	Local weather stations and climate models ( <a href="#">Laaha et al., 2024</a> ).
Soil and pedological characteristics	Available water storage capacity, hydraulic conductivity, soil texture...	Derived from field sampling and pedotransfer functions ( <a href="#">Saxton and Rawls, 2006</a> ).
Agronomic	Tools, timing, and conditions for technical operations such as soil preparation, sowing, harvesting, irrigation, and fertiliser application (covering type, dosage, and application timing), as well as information on crop rotations.	Collected through surveys, agronomic literature, and expert consultations.
Farm and land use	Farm sizes, numbers, and crop distributions	Mapped using the graphical parcel register, a database derived on farmers' declarations to the Common Agricultural Policy (CAP).

## 2.4 Production of the variables analysis agro-hydrologic foresight grid

To carry out this analysis, a grid was developed from 32 agro-hydrologic foresight scenarios under climate forcing, spanning various scales (local, regional, national, and European). Each scenario went through the same process: extracting form of variables in order to create different categories of variables. The aim was to identify key determinants characterizing future agro-hydrologic watersheds by isolating variables that describe these systems in their various forms (internal, external, the variable itself and its expression). To structure this grid, thematic units were created by grouping major variables recurring across scenarios, such as cropping systems, farm inputs, and public policies (Table 11). These units and set of variable form the foundation for defining one possible future agro-hydro systems under climate change.

This preliminary analysis also supports a second objective: tracing variable pathways to uncover causal links and identify how specific variable's form combinations relate to different agro-hydrologic system types. Each scenario was deconstructed to associate certain form of variable sequences with guiding questions. For instance, how a scenario appraises achieving a good status for water resources or which politics guided to a vegetarian diet. Linking these variable forms helps illustrate how consistent and robust configurations of agro-hydrologic systems could plausibly emerge in the future. It also helps to build a particular lifestyle that can be associated to a specific future, based on the association of the different forms of variable. To continue on the example of the diet, the diet is going to have an impact of the crop system and the choice of production, but also on biogeochemical cycles based on these food productions and on pollution that are direct impact of these productions.

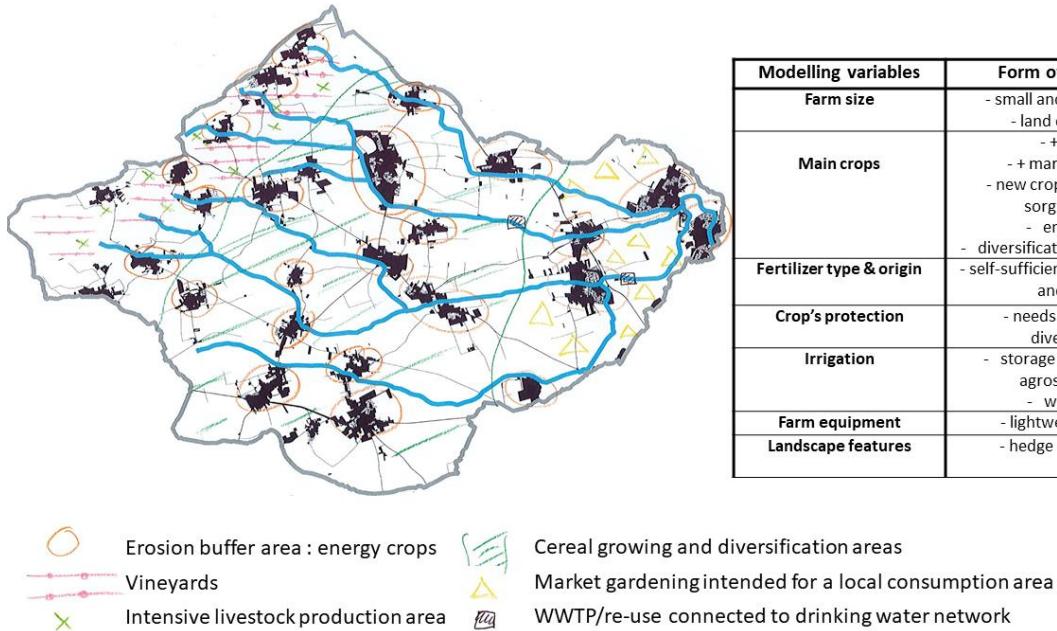
## 3. Methodology for bridging statements/narratives to storylines following

### 3.1 From statements to a consistent story

The generation of a consistent story involved two main phases, as described in this section. The first phase was the identification and selection of key variables with uncertain future developments that shapes scenario at both global and local scale, to capture relevant information. Second, analyzing interactions between these factors. The second phase involved analysing the interactions between these different forms of values to establish plausible pathways. The key steps for producing a consistent story from stakeholder statements are illustrated here using one of the four stories developed in the process.

#### 3.1.1 Collecting modelling variables

A preliminary selection of variables was undertaken to define model inputs, following the approaches used in previous studies that prioritise expert-driven choices ([Kosow, 2016; Poux & Aubert, 2018](#)). The image-building workshop was designed to collect modelling variables (i.e. those influencing the agronomic and hydrological dynamics of the catchment) from participants. Asking participants to identify specific variables meant that they were involved from the outset and the process was accelerated, in line with the frugal design of the workshop.



*Figure 47. Example of a map of the region in 2070, filled in by stakeholders during the workshop (original content translated into English).*

Figure 47 illustrates the participatory setup, featuring an empty map and a partially completed table, collaboratively filled by one of the groups during the workshop. The map provides a rapid and precise visualisation of the projected territory in 2070, highlighting the types of crops present and their spatial distribution. The accompanying table summarised the modelling variables, providing a clear overview of local agricultural organisation.

The future envisioned by participants emphasizes self-sufficiency, primarily in food and energy, but also in certain industrial goods (e.g., textiles, construction materials). The form of the variables consistently reflects the goal of supporting a diverse agricultural system while minimizing reliance on inputs that cannot be produced within the catchment.

#### Storyline at this step:

By 2070, agriculture within the Souffel catchment is highly diversified, with mixed farming, cereals, market gardening, and vineyards. The system prioritizes self-sufficiency, using manure and legumes to reduce mineral fertiliser dependence. The family farming model is maintained through restriction on farm expansion, the promotion of crop diversity, and the integration of landscape elements such as hedges. Buffer zones surrounding villages serve to prevent erosion and provide local energy supply.

#### **3.1.2 Extracting participants' variables from statements**

During the image-building workshop, participants collaboratively constructed a vision for the future of the territory. This process involves not only refining predefined model variables, but also introducing new ones through their dialogue. As highlighted in previous studies ([Delmotte et al., 2017](#); [Trutnevye et al., 2014](#)), these emergent variables, explicitly suggested and evaluated by stakeholders, can significantly influence images at both local and broader scales. A key challenge lies in identifying these variables within stakeholder statements. Here, a variable was defined as a concept or keyword that can potentially shift the scenario's

direction, either by introducing a new dimension or enriching an existing one, independently of pre-established modelling inputs.

Building on this example, analysis of the group's discussions revealed two primary types of variables. **Internal variables** describe what is going on in the system, which is defined by Souffel's catchment agronomic and hydrologic characteristics. For example, "pollution" is addressed through practices aimed at enhancing soil fertility, while "farmer compensation" emerged as a critical concern, with participants proposing strategies including high-value crop cultivation and diversified, farm-based activities such as food processing or agro-tourism. In contrast, **External variables** originate from outside the catchment but exert direct or indirect influences on it, reflecting the broader context within the local system operates. Examples include "agricultural training", which participants suggest should emphasise agroecological practices, and the "attractiveness of the farming profession", which they argue could be improved by reducing drudgery without increasing technological dependence. These external variables are typically influenced by national, EU policy and research progress.

#### Storyline at this second stage:

By 2070, agriculture within the Souffel catchment is moving toward greater self-sufficiency, with a focus on sustainable practices aimed at reducing environmental impacts including water pollution. This includes minimising the uses of fertilisers and pesticides, integrating on-farm energy production by exploiting landscape features, and supporting these shifts with agroecological trainings. A strong diversification of production facilitates the development of new local markets connected to the nearby city, improving economic resilience and ensuring fair compensation for farmers. Maintaining the family farming model requires increasing the number of farmers, which in turn depends on making the profession more attractive. This is achieved not through high-tech solutions, in addition to fair and stable remuneration.

### **3.1.3 Analysing all the variables together**

Once all properties, including both predefined model variables and those directly proposed by participants, are identified within each image, the next step is to compare them with the categories in the analysis grid ([section 2.4](#)). This involves organising the participant-derived variables within the established literature-based framework. This process serves two purposes. First, it ensures a comprehensive representation of the variables extracted from the workshop, validating that the diverse perspectives captured were appropriated into the overall system analysis. If participant-derived variables aligned with the literature-based grid, it confirms the coverage and completeness of the future territory image. Second, aligning these variable with established categories facilitates the consolidation of stakeholder inputs, strengthening internal consistency and creating a more robust image of the future system. This approach helps anchor the image in both local insights and broader trends. This stage required an in-depth analysis of participant quotations to accurately extract and classify variables according to literature-based categories, ensuring that no critical perspectives are overlooked (Table 11).

Table 11 : Table of literature-based categories (Col. 1) and participant-defined variables (Col. 2), with modelling variables in bold and other stakeholder inputs in black (UAA = Utilised Agricultural Area), illustrated here following the same example.

Literature-based categories	Variables	Overview of the future system based on stakeholder inputs	Example of quotations
<i>Soil</i>	Tillage	Erosion minimized via practices like no-till	"Less tillage is needed"; "we'll have to introduce systematic soil cover"
	Soil fertility	Increasing due to extensive practices and erosion control measures	"We should introduce a soil fertility indicator"
	Soil pollution	Decreasing thanks to reducing the use of inputs	"This will help reduce pollution in the soil"
<i>Cropping system</i>	<b>Main crops</b>	Crops diversified with old varieties, winter crops, and energy crops focused on subsistence farming	"The problem is not grains, but their diversity"; "The resilience factor must be diversity, between winter and summer crops for example"; "industrial culture needs to be restored"
	Diversification & crop rotation	Twofold diversification: more crops per parcel and new systems (vineyards, market gardening) relying on long rotations integrating various crop	<b>Linked to the map</b>  "Resilience is also based on rotations and lengthening them"
<i>Livestock system</i>	Livestock size	Re-emergence of mixed farming with intensive production area	"Mixed farming would increase diversity, which would be interesting from our point of view as managers."
	Grassland	Livestock production associated with grassland area	<b>Linked to the map</b>
<i>Farm inputs</i>	<b>Fertiliser type &amp; origin</b>	Rely on manure and legume-based rotations	"We need to be self-sufficient in nitrogen, and stop buying mineral fertilisers."
	<b>Pesticide</b>	Limited use thanks to diversification	"If we diversify, we reduce the risk of pests, which means we can limit the use of pesticides"
<i>Farm economy</i>	Farm structure	Composed only by family farms	"We lose out if farming is taken out of family hands "
	Autonomy level	Must strive for self-sufficiency (energy, food production, minimising the use of inputs...)	"Farm autonomy is another resilience factor."; "We should try to go beyond farm self-sufficiency, and start with energy production."
	Farmer income	Farmers become civil servants, increase net margin per hectare by decreasing inputs, reducing fuel but also creating sectors such as	"We need to radically change compensation."; "We could imagine the creation of a belt of market gardens near Strasbourg to supply food in a short circuit."; "we need to link biomass fuel production with local heating systems"

		local markets or biofuel boilers	
	Income diversification	Promoting farm-based activities: guest house, food processing, multiplying labels to create new markets	"Today, few farmers process their products on the farm, but this could change."; "To improve consumer confidence, labels could be introduced."
	<b>Farm equipment</b>	Lightweight machines and no technological promises	"Robotisation is not compatible with what we want to do."
<i>Employment</i>	Type of employment	Family farms rely on family members or close relations and group support system	"We need to return to self-help systems."
	Trainings available	Especially about new agro-ecological concept	"We need to change minds, and this goes hand in hand with a change in training."
	Attractiveness of the farming profession	Mostly relying on reducing work drudgery and increasing incomes	"We need to think about how to make the profession more attractive and less arduous, but without using new technologies"
<i>Public policies</i>	Regulatory instruments	Modify the operation of the payment for environmental services towards less incentive measures	"If regulation could replace EPS with something more effective."
<i>Landscape</i>	UAA*	Stable but confined by buffer zones	<b>Linked to the map</b>
	<b>Key features</b>	Hedgerows, agroforestry and zoned territories with buffer areas	"Agroforestry must be encouraged"; "These hedges could also provide fuel for multi-fuel boilers."
	Land diversification	The territory is split in several parts that have specific vocations	<b>Linked to the map</b>
	<b>Farms' characteristics</b>	More but smaller farms	"We should go back to small farms, small areas."
<i>Energy</i>	Source used	Biomass (miscanthus, agroforestry wood) used for heating; no other sources mentioned	"Buffer zones could be created around villages to combat erosion, for example."
<i>Hydrology</i>	Irrigation	Irrigation focused on market gardening, limited to east watershed farms above groundwater	"For field crops, we're going to do without water, or at least we won't have to, as requirements will decrease."; "Water requirements for market gardening will increase."
	Water quality status & river withdrawal	Efforts to reduce river pollution and stopping withdrawal	"Miscanthus and sylphia help fight pollution.", "If we stop using mineral fertilizers and reduce pesticides, we can limit river pollution."

This classification in Table 11 admits a wide variety of variables, which requires careful differentiation between each variable and the multiple forms it may take, which is often a complex task when analysing speech. It also highlights the varied functions that variables can serve: some are **descriptive**, capturing static features like crop types, while others are **predictive**, reflecting dynamics processes, such as how the attractiveness of farming can drive the growth of farmer population. Additionally, as discussed earlier, values can also be classified based on their relationship to the system. Internal variables, like those related to cropping system within the Souffel catchment describe processes that occur within the system itself. In contrast, external variables, such as public policies, originate outside the catchment but exert direct or indirect influence on its dynamics.

#### Storyline at this third stage:

By 2070, agriculture within the Souffel catchment adopt a diversified mixed farming model, characterised by a wide range of crops, including perennials, legumes, grasses, and grasslands, strategically distributed across designated areas. Small parcels are interspersed with landscape features, particularly near villages, which contribute to energy production and support broad self-sufficiency in food, energy, industrial goods, significantly reducing dependence on external farm inputs. Soil and water conservation are prioritised, in order to minimise erosion and soil pollution. Water, primarily allocated for irrigating market gardens, is protected from non-point pollution through the controlled and limited application of fertilisers and pesticides. These measures reflect a broader agroecological strategy, reinforced by farmer training programs that promote advanced practices and technical such as extended crop rotations and permanent soil cover, intentionally steering away from high-tech solutions. Economically, farmers receive remuneration comparable to civil servants or through targeted agricultural policies, while also generating income from selling their products to nearby urban markets, where their goods benefit from quality certification. Additional revenue is derived from diversified on-farm activities, ensuring fair remuneration, stronger policy support, and positioning farming as a vital and respected profession across the territory.

Despite this structured classification, significant gaps remained for building a robust vision and some information pointed in potentially conflicting directions. For instance, while certain stakeholders advocated for territorial self-sufficiency, they simultaneously emphasized creating local markets for a nearby city, which may imply a preference for a large-scale production. Additionally, the table highlighted the need to connect various variables to effectively capture systemic interactions. For example, soil fertility was linked to crop system through practices like diversification and crop rotation, and to livestock management through the manure use. Building on these insights, and after verifying the concordance between participant inputs and the analytical grid, the next logical step is to refine this material to build a consistent and credible future image.

#### **3.1.4 Selection and exclusion of variables**

After assembling the previous elements, the next stage was to build the core structure of the scenario, by determining which forms of variables should be retained or excluded. This phase can be understood as a heuristic process, as described by Hattori and Oaksford (2007), where observation facilitated the identification of significant covariations among variable forms. To effectively select or exclude properties, those that contradict the primary narrative or fail to

provide meaningful contributions to the core image were removed, in alignment with the Markov assumption ([Gantar, 2009](#)).

To illustrate this stage, we continue with the same example to show how certain variable forms may be excluded to generate a consistent storyline. These exclusions fall into two main categories: forms that are clearly irrelevant, and those that may be relevant but were insufficiently articulated by participants. One example of an irrelevant form that is taken the variable “farm economy” is the creation of product labels. While labels typically serve market-oriented objectives, they are misaligned with a vision of territorial self-sufficiency promoted by the participants for this image that seek to reduced reliance on external inputs through agroecological practices. Another example concerned the tension between the goal of food self-sufficiency and the development of market outlets for nearby urban centers. Although the former supported local diversification, it conflicted with the latter's focus on meeting external demand, suggesting the need to either revise the proposed causal link or to reconsider the pursuit of external market development altogether. Likewise, depicting farmers as civil servants while relying on a market-based local economy presented a contradiction that must be resolved for the scenario to remain internally coherent.

The second category includes variable forms that are relevant but not well-defined, necessitating further refinement. For instance, training programs were frequently mentioned, yet it remains unclear who would initiate and fund them, whether the state, regional authorities, or local actors, and what specific knowledge they would deliver. Similarly, reducing work drudgery is often cited as a goal, but the means to achieve it are not clearly specified. The group proposed pooling resources as a potential solution, explicitly rejecting over-reliance on technology. In the context of expanding the agricultural workforce, enhancing the manageability of farm work was seen as essential for boosting its attractiveness. Public policy instruments represent another area requiring further development. Beyond a mention of shifting CAP incentives, the scenario lacked detailed discussion on the regulatory tools required to support its vision. This gap needs to be addressed through the introduction of new policy mechanisms that align with the agroecological goals of the territory. Water management remained also underexplored. Although improvements in water quality were acknowledged, largely as a result of reduced pesticides and mineral fertiliser use, there is no discussion of regulatory approaches or strategies for managing this resource.

### **3.1.5 Linking variables that work together**

Establishing causal links is a complex process, often rooted in personal expertise and tacit knowledge, and is sometimes compared as an art or professional skill rather than a formalised method ([van't Klooster et al., 2024; Rottman & Astie, 2014](#)). The aim was to define a consistent and plausible agro-hydrosystem based on causal relationships between variables and the forms they take. Some of these links have already been identified through the analysis grid ([section 2.4](#)), which provides a basis for understanding established mechanisms and forecasting potential relationships. As previously mentioned, some of the mechanisms underpinning the scenario are rooted in specific lifestyles, and the scenario must reflect the underlying forms associated with particular variables. To illustrate this, consider a scenario focused on maximizing local food production. According to prior analyses, dietary patterns, when they are framed, are significantly influenced by public policies; either through

environmental regulations, such as restrictions on pesticide and fertilizer use, or through agricultural subsidies that support specific crops, for instance those adapted to climate change. Access to a healthy diet is also contingent on the economic capacity of households, as local food products are often more expensive. Therefore, for such a scenario to be viable, a substantial portion of the population must be financially capable of purchasing these locally produced goods. In contexts where local authorities and communities encourage the consumption of local food, mechanisms such as significant public subsidies at local level can be leveraged to enable all consumers to obtain food at affordable prices. In addition, policies that promote more farmers to engage in local production can help to reduce food prices by increasing supply, thereby strengthening the viability of local food systems.

However, new causal links may also emerge. First, certain relationships were grounded in scientific theory or real-world mechanisms. For instance, stakeholders in this scenario proposed significantly limiting soil erosion as a means to improve soil quality. That would be achieved by implementing buffer zones and ensuring systematic ground cover on agricultural fields, both of which are supported by agroecological principles aimed at reducing runoff and maintaining soil structure ([Altieri et al., 2015](#)).

Secondly, interactions among variable forms can be analysed by examining how internal system variables and external factors interconnect, offering a systemic and consistent perspective ([Bou Nassar et al., 2021](#); [Geels, 2020](#)). This multi-level framework organises variable forms within a unified image while distinguishing them by their respective level of influence. Such differentiation enables the testing of scenario consistency by assessing how macro-level forces shape micro-level realities and vice versa, thereby revealing interdependencies. In a foresight context, this approach also helps overcome socio-technical lock-ins by identifying the changes required at each level to facilitate a transition toward a desired future ([Mora et al., 2020](#)). To illustrate this point using the same case study, it becomes evident that the internal functioning of the agro-hydrological catchment must be connected to broader external systems. In particular, the viability of the proposed agricultural model relies heavily on political and structural support. For instance, such a model assumes a significant increase in agricultural labor and a shift toward reduced farm sizes and lower per-farm production, which is strongly contrasting with the current trajectory, which prioritizes expanding cultivated areas and production factors (e.g., fertilizers, pesticides, mechanization, new technologies, etc.). This discrepancy raises the question of the appropriate governance level required to enable a deep transformation of agriculture. Historically, the Common Agricultural Policy (CAP) has been a key driver of agricultural change, especially in countries like France, by reshaping farming structures and practices ([Ladin & Berriet-Solliec, 2023](#)). While the future transition may once again be driven at European level, it also reflects a broader shift in thinking, from a purely productivity-driven paradigm to one focused on environmental sustainability. This shift is undoubtedly being catalysed by climate change and the recognition that dominant agricultural models may no longer be viable. Policy instruments can support this transition by redefining eligibility criteria for subsidies, favouring certain crops and farming practices over others. Moreover, these broader policy shifts must be translated into locally adaptable strategies, allowing territories to align agricultural production with regional ecological conditions and market demands.

### Storyline at this step:

By 2070, agriculture in the Souffel catchment has undergone profound transformation, driven primarily by major shifts in European policy and the CAP. These policies now prioritize environmental sustainability and public health, aiming to align food production with local consumption. Subsidies make diverse, locally produced food affordable for most households, while ensuring farmers earn a fair income through support for land access, equipment, and fair pricing. Diets are shaped by regional agricultural capacities, with EU strategies downscaled and implemented by local authorities.

In the Souffel catchment, this has resulted in diverse mixed farming systems incorporating a wide variety of crops (perennials, legumes, grasses, and grasslands). Fields are small, often bordered by buffer zones near villages, contributing to local energy generation and limiting erosion. Soil and water conservation are central: erosion and pollution are minimized, fertilizers and pesticides are limited, and irrigation is reserved mainly for market gardening. Strict water governance reduces pollution and drinking water usage, with strong penalties for contamination. This agroecological shift is supported by EU-funded farmer training centers in rural areas, promoting long rotations, permanent soil cover, and low-tech solutions. The territory is nearly self-sufficient in food, energy, and is approaching for industrial goods, while minimizing reliance on external inputs. Economically, most farmers manage small plots individually, reducing labor needs. Households dedicate a significant share of their income to food, securing farmer livelihoods. Farming has become a valued and well-supported profession, attracting a large number of committed individuals and fostering strong professional solidarity, especially during labor-intensive periods.

## 3.2 Structural framework approach for strengthening scenario consistency

### **3.3.1 Asserting normative criteria**

Following the creation of the image, the initial criteria (cf [section 2.2](#)) were emphasised. The goal of this step was to endorse that the scenario maintained its normativity integrity, as stakeholders may have occasionally overlooked certain parameters. Consequently, the modification of the narratives follows several stages:

#### **(1) Positioning the criteria response gauge on self-positioning cursor.**

This criteria cursor serves as a transparency tool, enabling the determination of specific construction thresholds (e.g., low, medium, or high reconstruction). The self-positioning method was preferred over alternatives, such as consulting stakeholders ([Volkery et al., 2008](#); [Allain et al., 2020](#), [Delmotte et al., 2017](#)) or relying on academic knowledge ([Mora et al., 2020](#); [Agami et al., 2023](#)). That choice was primarily guided by the principle of frugality and the objective of minimising the time commitment for stakeholders, ensuring that time consuming processes do not become burdensome for certain participants.

As shown in Figure 48 the retained example meets the first two criteria:

(i) The example demonstrated resilience to climate change, as the image accounts for climate variability and potential agricultural diseases by increasing crop diversity, improving crops rotation, and incorporating landscape features that provide shade for fields. It also addressed energy concerns through a biomass approach, which can substitute for fossil fuels, while

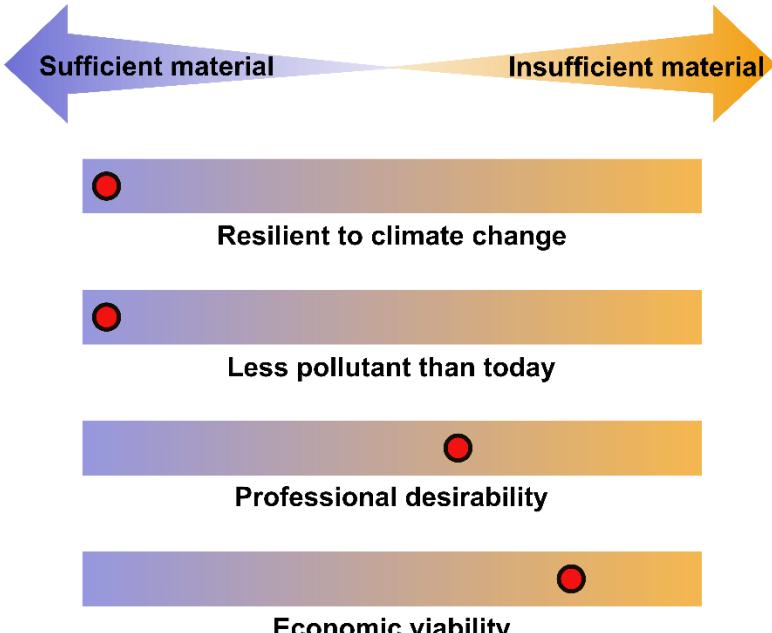


Figure 48. Self-positioning of the image in relation to the initial criteria.

minimising the use of mineral fertilisers, significant contributors to greenhouse gas emissions in agriculture due to their production and soil application ([Walling & Vaneekhaute, 2020](#)). In addition, the image reduces the vulnerability of territory by strengthening its self-sufficiency. (ii) Pollution reduction, compared to current practices is objectified by eliminating mineral fertilisers and significantly decreasing pesticide use, which together reduce pollution in the soil, water and air.

However, for the remaining two criteria, the available material was insufficient. Regarding the desirability of the farming profession, only vague indications, such as a reduction in work drudgery, were provided, without specifying how this reduction will be carried out, aside from the stipulation that it should not rely on increased use of technology. Concerning the viability of the economy, stakeholders' statements offered limited insights. For example, the agricultural economy was envisioned to transition from one focused on reducing production volume to one centred on efficiency, with the aim of achieving self-sufficiency. To achieve this, an economy markedly different from the current system must be developed.

## (2) Modification of the image to meet critical criteria

Having identified the necessary modifications, the next step was to focus on improving the two remaining criteria: the desirability of work and economic viability. These modifications must rely on credible expertise to enhance the scenario's feasibility and accredit that plausible assumptions were considered. This process is detailed in the next section.

### 3.3.2 Validation by mobilising local expert opinions and scholarly sources

The decision to draw to expert opinion facilitated a more comprehensive consideration of future conditions across various domains, including agronomic consistency and adaptation, shifts in consumption patterns, and potential future agricultural policies. This approach provided valuable insights that strengthens the scenario in terms of probability and consistency ([Mora et al., 2020](#); [Kosow, 2015](#); [Agami et al., 2023](#)). In addition, by incorporating

a diverse range of expert sources, including researchers and scholarly publications, the potential for individual subjectivity bias was reduced ([Mahmoud et al, 2009](#)), while also incorporating specialised knowledge on local problematics ([Cook et al., 2014](#)).

1) Self-sufficiency was the core assumption that is shaping the image overall vision, focusing on two key criteria: economic viability and the desirability of farm work. Economically, if local self-sufficiency is central, the economy must shift its focus from growth model driven by international trade to one prioritising human well-being ([Stiglitz, 2012](#)). This localism should contrast with the EU's CAP, which often disconnects agriculture from rural livelihoods ([Gray, 2009](#)), and instead anchors the economy in rural development through new models that support local livelihoods ([Hogan & Lockie, 2013](#)). Localism is often paired with bottom-up decision-making, where local communities rather than centralised governments, drive the decision-making process. This approach advocates for state decentralisation, resulting in higher local taxes and lower national taxes ([Hildreth, 2011](#)), while strengthening community power by leveraging local knowledge and resources to achieve self-sufficiency ([Hogan & Lockie, 2013](#)). Under localism, farm incomes are informed by several theories ([Enthoven & van den Broeck, 2021](#)). The principal-agent theory suggests that direct sales to consumers allow farmers to set their own prices, often securing a premium compared to longer supply chains. Meanwhile, transaction cost theory supports bulk purchasing arrangements, such as those for mass catering, which reduce the number of contracts and lower associated cost of decision-making, planning, and negotiation. Additionally, farmers are inclined toward this internal market as it aligns with self-sufficiency, provided that the prices of goods are fairly integrated into the new economy to sustain their livelihoods. Concerning the desirability of farm work, several points are noteworthy. Firstly, the significant increase in the number of farmers indicates a return to the countryside, driven by the growing need for locally produced food, energy and materials, which constitute new markets for prospering in the emerging economy. As the farming population increases, the traditional burdens of long working hours, limited holidays and strenuous physical labour are mitigated. This reduction in drudgery is achieved through a more equitable distribution of tasks and the collective organisation or mutualisation of certain of certain activities. In this localist framework, the community transitions from individualistic behaviors to a collective mindset based on mutual aid which in turn enhances social recognition of farmers ([Hogan & Lockie, 2013](#)). Moreover, the closer relationship between consumers and producers improves food traceability, increasing transparency in the production process and allowing consumers to better understand the constraints of agricultural practices ([Enthoven & van den Broeck, 2021](#)).

2) After collecting the work produced in the previous stages, the result was presented to a local agronomic expert to assess its overall plausibility. During discussion of the major trends, it became evident that many stakeholder visions featured a revival of livestock production. However, the expert pointed out that such a resurgence may be unlikely given regional trends, including a continued decline in livestock numbers and limited access to the requisite equipment and infrastructures. The dialogue also extensively explored the potential of crop rotations and the suitability of various crops for the area. The expert also emphasised that recent technological and economic shifts favour diversified cropping systems over livestock-based models. To ensure consistency within the scenario while highlighting differentiation, the final image excluded livestock production, instead focusing on sustainable, crop-based agriculture aligned with current regional trends and future prospects.

### 3.3 Result: final storyline

Upon completion of the previous stages, the final state of the storyline was compiled and is presented below. This concise and explicit storyline provides an overview of the territory in 2070 and outlines the primary changes from today. It also serves as a clear summary of the work completed, supporting stakeholders envisioning the future world.

#### **Agroecology for local self-sufficiency**

By 2070, European and national policies prioritise food and energy self-sufficiency at the intercommunal scale. Territorial boundaries have been redefined to better support this goal. This strategic shift is a response to extreme price volatility caused by climate change, resource depletion, and rising international transport costs. Agriculture has become increasingly diverse and complex, driven by emerging agroecological expertise which include stopping the use of pesticides and mineral fertilisers. Farmers lead this knowledge revolution, actively participating in regular training programs and collaborating closely with researchers through on-farm trials. This renewal of expertise strengthens both the legitimacy of the profession and its recognition by society, thereby increasing the respectability and appeal of farming. Agricultural landscapes have been spatially reorganised to tackle environmental challenges such as soil erosion, runoff, and sustainable energy production. Best management measures like buffer zones and systematic ground cover may contribute to soil protection. At the same time, energy-intensive and heavy machinery are disappearing due to prohibitive costs and the impracticality caused by fuel shortages. As a result, the size of farms and plots has been reduced. This downsizing, coupled with limited technology use, has increased labor needs, positioning agriculture as a major source of employment. With more workers, tasks are better divided. Working conditions have also become more flexible, with frequent rotations leading to shorter working hours and more holidays. Even physically demanding tasks, like heavy lifting, are now distributed among workers, thereby reducing individual strain. This transformation in agricultural is closely linked with localised governance and production systems, adapted to the specific need of each territory. Driven by local communities, newly formed intercommunal entities have invested heavily in achieving energy independence. They are also progressing toward self-sufficiency in food production, construction materials, textiles, and other key sectors. Structural changes support this shift. Diets have shifted towards more plant-based consumption, accompanied by a reorganisation of both the economy and professional practices. Rural areas, like Souffel, have attracted new residents and now rely on strong resource-sharing systems. Water, equipment, energy, and knowledge are collectively managed to support sustainable development. Increased political participation has also strengthened community ties, helping anchor the political project in a viable and resilient long-term reality.

#### **4. Methodology for translating storylines into inputs data for an agro-hydrological model**

Following the development of the storyline, the next step involves constructing the input data for the selected model, MAELIA, which was developed by a research team at INRAE ([Tribouillois et al., 2022](#)). While this agronomic model offers many possibilities, it also imposes

Table 12. Examples of agronomic implementation based on stakeholder image based on academic literature, experts and local literature.

Variables	Agronomic features designed by participants	Academic literature	Agronomic expert & local literature
Main crops	Energy crops	Miscanthus is a high-yielding perennial plant that can help prevent soil erosion and contribute to water purification. It requires neither fertilisers, pesticides, nor weeding ( <a href="#">Morandi et al., 2016</a> ).	In Berrwiller, Miscanthus is cultivated locally on 27 hectares to supply a communal boiler, which provide heating for all public buildings and approximately 80 private homes. The crop has a productive lifespan of at least 20 years.
	Legumes	To enrich soil, improve fertility, and feed the population, legumes must cover at least 12% of the Utilized Agricultural Area (UAA), a significant increase from the current 4% in France, alongside a major reduction in meat consumption ( <a href="#">Poux &amp; Aubert, 2018</a> ).	Legumes should be positioned at the beginning of the crop rotation, ideally preceding high-demand crops like corn or grass.
Fertilisation	Based on the introduction of long-duration cover crop at the beginning of a cycle	Integrating perennials into crop cycles can boost yields and economic stability by reducing soil erosion, input requirements, and weed pressure ( <a href="#">Tully &amp; Ryals, 2017</a> ). The greatest benefits from cover crops arise from species mixtures, especially combinations of legumes and grasses ( <a href="#">Brooker et al., 2024</a> ).	Moving toward organic practices involves preparing fields by planting alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> ) for at least two years at the start of the rotation. When legumes are grown for their nutrients contribution, they should be left on the ground to allow time for decomposition, allowing sufficient time for nutrient release and soil assimilation.
	Based on the introduction of nutrients through intercrops in long rotation	Cover crops can be integrated in various ways. Intercropping, especially with legumes, offers benefits such as pest control, reduced fertiliser use, pollution mitigation, and enhanced yield stability ( <a href="#">Stagnari et al., 2017</a> ). Additionally, it improves soil quality, particularly by reducing soil erosion, and can increase subsequent crop yields while lowering water needs ( <a href="#">Blanco-Canqui et al., 2015</a> ).	Manure can be replaced by legume cover crops, provided the biomass remains on the field for grain and field crop systems. In the absence of external inputs, frequent use of legumes as intercrops is essential to maintain soil fertility. These can be introduced between main crops at different times, early spring before spring crops, and from June to October before winter crops.

notable constraints typical of such modelling frameworks. The following section details the process of converting agronomic foresight concepts into model-compatible inputs, focusing on (i) translating stakeholders' agronomic perspectives into general principles, (ii) adapting these principles to the model's structural constraints, and (iii) addressing long-term assumptions and the influence of the model's framing. The second part addresses the creation of the spatial representation, designed both to visualise the envisioned future image and to serve as input for the model.

#### 4.1 Bridging modelling constraints and frame effects

##### 4.1.1 Exploring agronomic practices

During the creation of the storyline, the types of crops were roughly identified; however, the surrounding agronomic system remained undefined. Table 12 summarises the major steps involved in refining agronomic details, focusing on specific properties. To construct a realistic agronomic scenario, two main sources were used and referenced in the Table 12, both of which are commonly employed in the process of scenario making ([Calleo & Pilla, 2023](#)). The first source, summarised in the second column, draws on academic literature that highlights global trends and potential developments. The second source, presented in the third column, incorporates insight from local experts, complemented by local literature mostly dedicated to farmers. This source provides insights on future scenarios based on local specificities, such as crop rotation practices and fertilisation levels. These sources help to ensure agronomic consistency by aligning biophysical constraints with stakeholder preferences and the final image's purpose.

Table 12 highlights the need to combine information from literature and local experts to implement agronomic practices adapted to local conditions, while ensuring their feasibility for farmers. The same approach has been applied to other variables such as irrigation, crop protection, as well as sub-variables like grains for major crops. Predicting future crops remains challenging ([Riera et al., 2025](#)), therefore the focus is placed on existing crop families, assuming their properties will remain consistent over the long-term, even as production and yield evolve. As an additional example, discussions with local experts led to prioritising crop diversity while maintaining smaller areas of corn and wheat, given their current high productivity. This approach aims to assess long-term yield evolution while ensuring sufficient productivity to support self-sufficiency. Once the crop selection was finalised, extensive work was undertaken, beginning with a review of agronomic literature, followed by integrating local specificities through expert consultation, to define the main cropping systems (market gardening, grains and field crops, energy crops, etc.) and their respective rotation systems. This process also involved testing new agronomic practices, such as eliminating mineral fertilisers and manure in favour of cover cropping and intercropping. Model results, particularly nitrogen stress indicators, will help determine whether these practices can feasibly replace conventional inputs. Additionally, as cover and intercropping are rarely used in the region, their widespread adoption would represent a significant shift at the local scale.

##### 4.1.2 Distinguishing model-compatible and non-integrable data for MAELIA

Following the collection of agronomic information, the next step involves its implementation within the MAELIA model. However, linking qualitative storylines to quantitative models

presented several challenges: (i) storylines are containing extensive information that cannot all be represented within a single modelling framework ([Elsawah et al., 2020b](#)); (ii) many existing models are unable to fully incorporate regional particularities such as irrigation systems ([Rinaudo et al., 2013](#)), and (iii) most models are calibrated to reflect current and short-term realities, rather than long-term changes and transformation ([Rounsvell et al., 2005](#); [Morgan, 2012](#); [Elsawah et al., 2020b](#)). It is also essential to integrate this information through a scale-based perspective, which ensures accurate translation and fosters compatibility between the broader narrative outlined by the storyline and its quantitative dimensions (see the Miscanthus example in Table 13) ([Villa et al., 2017](#)).

MAELIA is an integrated model closely aligned with field crop systems and conventional agriculture, originally designed to support decision-making related to irrigation ([Tribouillois et al., 2022](#)). Although the model has evolved, addressing its limitations required developing proxies in close collaboration with modelers, as its initial purpose did not fully align with

*Table 13. Examples of agronomic implementation choice and their translation in MAELIA model existing variables.*

Variables	Agronomic implementation	Model expert, documentation & implementation
<b>Main crops</b>	Miscanthus is cultivated as an energy crop around villages, covering 2,500 hectares—sufficient to supply energy for approximately 8,000 households and 30 communal buildings.	As Miscanthus is not available as a crop in within the MAELIA model, it has been represented through an alternative rotation consisting of sorghum and ryegrass intercrop. The maximum productivity for sorghum intercrop was set at 35 quintals per hectares.
	Legumes account for approximately 30% of total production, divided into two main uses: the larger share is left in the soil to enhance nutrient content, while the remainder is allocated for human consumption.	MAELIA includes different types of legumes, allowing us to assess their growth under climate change scenarios. The model also enables specification of whether the legume biomass should be returned to the soil or harvested.
<b>Fertilisation</b>	Alfalfa is the most suitable cover crop to initiate the rotation, aligning well with local conditions.	As alfalfa is not available in MAELIA, it was replaced by vetch, also a legume providing effective ground cover. Unlike the perennial alfalfa, vetch must be replanted annually and is incorporated into the soil to enhance fertility. It was used at the start of two rotation systems: (i) two years of vetch followed by four years of market gardening, and (ii) two years of vetch followed by six years of field crops.
	A long rotation of main crops (grains and industrial crops) is structured by alternating winter and spring crops, with legume cover crops integrated between them.	MAELIA enables the definition of sowing and harvest dates, allowing optimal timing between two crops while tracking intercrop biomass production.

current objectives. Table 13 illustrates how the assumptions discussed in the previous section can be implemented within the MAELIA framework.

#### 4.1.3 Dealing with long-term assumptions to cope with future uncertainties

Long-term assumptions pose a major challenge in modelling socio-ecological systems, which are characterised by “non-linear spatio-temporal dynamics” ([Elsawah et al., 2020a](#)). These dynamics are difficult to integrate into models—especially when projecting far into the future under conditions of considerable uncertainty. In our example of agro-hydrologic modelling, the primary focus has been on agronomy. However, envisioning agriculture fifty years from now required imagining potentially drastic changes, especially when compared with the transformations observed over the past fifty years ([Rounsevell et al., 2004](#); [Prager & Wiebe, 2021](#)). Indeed, this context raises several critical questions related to long-term variability, a challenge further exacerbated by climate change. A key concern is the future of crops: today’s dominant crops may be replaced by those better adapted to drought and heat stress, particularly perennial crops ([van Leeuwen et al., 2024](#)). To address this initial agronomic uncertainty, we opted to work with existing crops, aiming to maximise diversity while modifying technical itineraries. One major adjustment involved shifting from spring crops to winter crops, for example for grasses, which appear to perform better under drought conditions. Technical itineraries themselves represent another source of long-term uncertainty. As with crop selection, it is difficult to predict which agronomic practices will prevail in the coming decades. To address this, we focused primarily on adjusting sowing and harvesting dates to avoid peak drought periods wherever possible. Additional assumptions about technical itineraries were made about the future use of agricultural inputs. For instance, scientific studies suggest a possible long-term shortage of phosphate fertilisers ([Illakwahhi et al., 2024](#)). In response, we explored techniques that eliminate the use of fertilisers altogether, positioning the model as a tool to test agronomic practices that may prove viable in the long term.

To amend variables that are not directly represented in the model, especially those that are difficult to anticipate, we introduced proxies. These are known and already-implemented model properties used to approximate long-term unknowns. For example, to account for technological change, which the model cannot explicitly predict, we used *working time* as a proxy. Rather than speculate about specific future technologies, we made assumptions about the amount and efficiency of labour required for various agronomic tasks.

Finally, we deliberately avoided over-constraining the system. Instead, we adopted a principle of frugality, prioritising simplicity and resilience in the face of uncertainty. Given the speculative nature of long-term modelling, our goal was not to deliver definitive feasibility assessments, but to explore plausible hypotheses grounded in current knowledge.

#### 4.2 Linking the storyline and model constraints to a spatial representation

The spatial representation served two main purposes: visualising changes and acting as an input for the model. It was developed throughout the workshop at different stages. Initially, stakeholders provided an overview of the territory by filling in a map (Figure 47), which includes details such as crop locations and buffer zones around urban areas. Additional spatial information was gathered directly from stakeholder statements. Table 14 summarises how these inputs can be translated into spatialisation tools, using quotations. The classification

follows key spatial translation methods commonly applied to agro-hydrosystems, as derived from storylines and scenario-based approaches. Land use, landscape features and agricultural characteristics, such as urbanisation, forests, agricultural land allocation, crop selection, and farming practices, are commonly addressed in research ([Stürck et al., 2016](#); [Brown et al., 2016](#)).

A key assumption was that urban areas within the catchment would remain stable. The implementation of different landscapes involved several operations, which are summarised in Table 14. Three main cropping systems were represented: (i) market gardening, (ii) a long rotation of grains and oilseeds incorporating intermediate legume cover to trap nitrates and grass to improve soil structure, and (iii) energy crops cultivated for collective boilers. Villages had two buffer zones, one designed for energy crops and another for market gardening, to facilitate local food access. A major effort was made to reshape agricultural land by reducing parcel sizes and allocating them to farmers using GIS tools.

Beyond direct spatialisation tools, university studies highlight additional factors influencing territorial structure, such as technological development, transport networks, and pollution management ([Rounsvell et al., 2005](#); [Houet et al., 2016](#)). During the workshop, resource management emerged as a critical element shaping the final landscape. Stakeholder statements provided insights into pollution control, resource conservation, and distribution, which in turn influence spatialisation properties. For example, buffers were prioritised to "avoid soil erosion", while diversification was encouraged to foster "a less pollutant state" and

*Table 14. Examples of spatial translation operated based on stakeholders' discourses (literal translation of quotations from French to English).*

Spatialisation variables		Quote from the workshop	Implementation
Landscape	Territorial planning	« We could create buffer zones around villages»; « We could create a market-garden ring to supply food in a short circuit»	Creating several buffer zones around villages
	Features	«We also need to integrate more agroforestry and hedgerows. These hedges could also provide fuel for multi-fuel boilers.»	
Agricole land use	Crops	« The main resilience factor must be crop diversity»; « We need a better balance between summer and winter crops»; « We could use energy crops to fuel boilers »; « We need to increase the proportion of legumes and organic nitrogen»	Assign specific crops and technical operations to each parcel, based on its location and size.
	Size	« We should go back to small farms, with small surfaces, especially for field crops and market gardening »	1) reshaping agricultural land by decreasing the size of both parcels and farms. 2) each parcel remain associated with a farm in order to estimate a total number of farmers up to around 4500.

"enhance self-sufficiency within the territory". These findings suggest that spatialisation tools are often embedded in broader discussions rather than explicitly mentioned.

#### 4.3 Results

GIS was selected for spatial representation due to its ability to accurately capture changes in land use patterns and landscape structures. Additionally, it allows for a plausible and realistic depiction of the territory by integrating multi-criteria analysis, attribute data, and spatial queries.

Figure 49 captures a single year within the crop rotation for both spatial representations, clearly highlighting the differences between the current territory representation (2020) and the one linked to the projected image (2070). Key changes include the introduction of buffer zones around villages and an increase in agricultural land diversity. Additionally, the smaller parcel sizes are distinctly visible, contributing to the overall landscape diversity, which is strongly more pronounced in the latter figure (Figure 49, right).

### 5. Discussion and insights

This discussion focuses on three key themes: (i) the inherent complexity of translation, which involves balancing fidelity for stakeholders' statements and consistency of the resulting images, (ii) a balanced approach to describing the socio-economic and political context surrounding the agro-hydrological narrative, and (iii) the interplay between qualitative and quantitative data.

#### 5.1 Striking a balance between fidelity and consistency

This methodology aimed to balance the creation of a consistent and robust image with fidelity to stakeholders' statements. In this sense, producing a consistent image can be seen as a form of betrayal, as verbatim statements cannot always be preserved. Nevertheless, these statements were included into the methodology to illustrate how they were transformed.

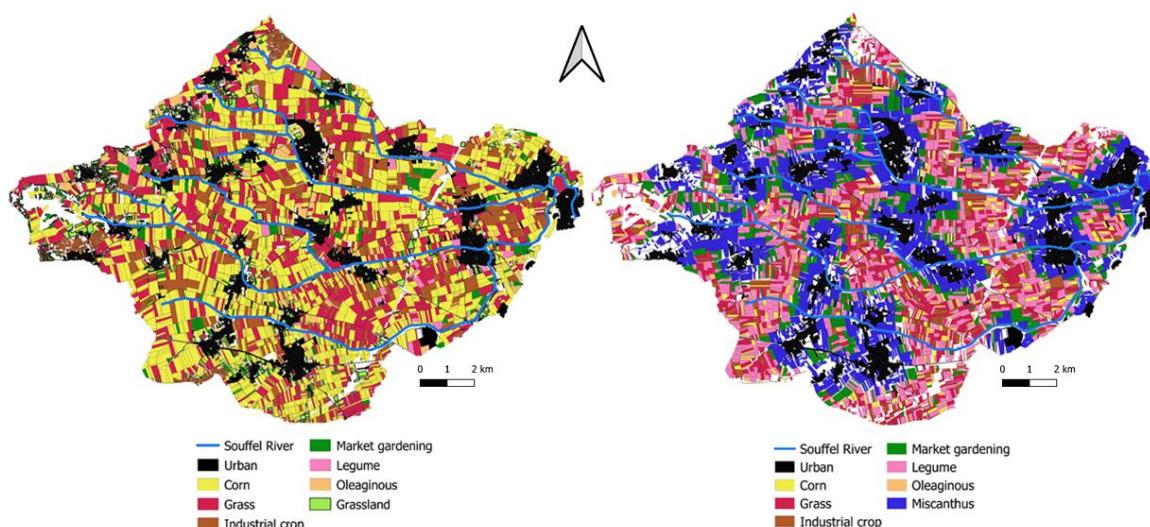


Figure 49. Evolution of spatialisation between the actual territory representation (left: from RPG-Graphical Parcel Register and regional land use database, 2020) through image of the territory in 2070 (right).

Actor-Network Theory (ANT) explores this tension between fidelity and transformation, highlighting how translation between different perspectives inevitably introduces the risk of distortion (Law, 2009), which is particularly strong in participatory foresight exercises (Delmotte et al., 2017; Rinaudo et al., 2013; Allain et al., 2020). This betrayal was further compounded by the fact that translation into storylines required a subsequent translation into model inputs, at which the image was conformed to the model's framework (Grove's & Lampert, 2007; Morgan, 2012; Elsawah et al., 2020a). This question is closely linked to questions of legitimacy of the voice of local actors within the participatory context (Volkery et al., 2008; Kunseler et al., 2015). However, the methodology presented also enhanced transparency by allowing readers to trace connections between stakeholders' inputs and scenario development. This approach aligns with effort to "ensure that the participatory processes add value to a foresight project" (Kunseler et al., 2015), in particular by increasing the legitimacy through the involvement of local stakeholders and showing how their contributions were incorporated, as well as by enhancing the credibility of the foresight through the integration of local characteristics (Bourgeois et al., 2017).

This paper aims to demonstrate that the traceability of participatory foresight is crucial, maybe even more than for scenario developed solely by expert teams where traceability is often considered as a "substitute for participation during scenario construction" (Kosow, 2015). Indeed, clear and explicit traceability is essential to improve the legitimacy of stakeholder participation. In other word, this transparency also contributes to building the overall consistency of the scenarios.

Another key constraint of this methodology was frugality, which shaped workshop design, particularly by limiting their duration to maximise stakeholder participation, and notably to facilitate the inclusion of farmers, a specific and essential stakeholder group (Rinaudo et al., 2013). This principle of frugality posed two challenges: (i) stakeholders had limited time to develop their ideas, leading to simplified assumptions and less detailed final images, necessitating additional work to ensure consistency, and (ii) the absence of iterative feedback loops prevents participants from reviewing modifications until the final workshop, reducing opportunities for validation. While short workshops facilitate broader participation, they also risk oversimplifying stakeholder perspectives and complicate of the translation of statements into storylines and model inputs. A potential improvement could involve selectively applying frugality, prioritising it for stakeholder engagement while allowing more time for the development of idea. Striking this balance would help minimise the risk of distorting stakeholders' visions, while enabling the scenario team to construct a scientifically robust and coherent narrative aligned with both stakeholder inputs and existing agro-hydrological scenario frameworks.

## 5.2 Setting boundaries: defining the scope of socio-political-economic in scenario development

An important issue that emerged during this work concerned the extent to which the socio-political and economic dimensions should be developed within the scenarios. Although this research was grounded in the involvement of local stakeholders, the construction of coherent and robust scenarios required situating these local dynamics within a broader, encompassing framework (Kunseler et al., 2015; Bou Nassar et al., 2021). Understanding how the local system functions necessitates placing it within a wider context. However, developing this

broader socio-political and economic future, beyond the agronomic and hydrological functioning of the catchment, proved to be one of the most challenging aspects for participants. Indeed, this process is time-consuming, exceeding what could reasonably be addressed during the workshops planned in this context. Moreover, the research team did not provide sufficient guidance in formulating questions to help participants frame this broader context, partly because doing so is inherently demanding and requires significant time and conceptual effort. Even with additional time allocated, the research team itself faced challenges in constructing this encompassing framework and determining appropriate boundaries.

The process of drawing up the scenarios involves a great deal of caution when it comes to the robustness of the image. It is essential to maintain a critical distance from the image and continuously interrogate its assumptions in order to account for the emergence of unforeseen events, while preserving its overall plausibility and coherence ([Bengston, 2015](#); [Hughes, 2013](#)). According to van der Steen and van Twist ([2012](#)), it is through integrating real-world political processes that genuinely novel systems can be imagined. Nevertheless, it is impossible to account for all socio-political and economic contingencies, especially as the range of possibilities expands with the scope of the scenario. While the involvement of various stakeholders may be a way for improving the integration of socio-economic and political processes ([Kunseler et al., 2015](#)), but it can also introduce biases or generate fragmented perspectives if not carefully managed (X). Despite these limitations, broader contextual framing can help embed scenario processes in wider and less deterministic political and institutional environments ([Voß & Bornemann, 2011](#)).

To define the boundaries of the socio-political-economic context, the process unfolded in several stages. Initially, we identified key assumptions within the scenarios to infer the types of lifestyles implied by the narratives. This enabled the integration of social, economic, and political dimensions into the scenarios in a more grounded way ([Saujot et al., 2021](#)). Transitioning from general propositions to specific lifestyle representations helped anchor the scenarios in a plausible societal form, particularly in terms of the relationship between individuals and political structures, consumption patterns, and the regulatory role of public policy and markets. This approach, while methodologically demanding, fosters a more systemic and transdisciplinary understanding of the image and required a holistic perspective. Nonetheless, this process helps identify the most appropriate political-administrative scale for implementing the scenario's goals and informing governance strategies. It also clarifies the population's needs based on their projected lifestyles, particularly with regard to the food-water-energy nexus. These considerations are especially relevant in a participatory context to help stakeholders envision potential futures. In contrast, the model inputs are narrower in scope and allowing less room for imaginative or qualitative dimensions, as human processes are inherently difficult to model ([Trutnevyte et al., 2014](#)).

### 5.3 Bridging qualitative storylines and quantitative inputs data

If combining qualitative and quantitative data fields is increasingly common in the field of foresight, it still constitutes a technical challenge ([Alcamo, 2008](#)). The iterative process between storyline production, which implies to build a robust, consistent and translatable image, and the subsequent modification of these storylines based on the modelling outputs

has been discussed by different authors ([Truntnevyte et al., 2014](#); [Elsawah et al., 2020b](#); [Bou Nassar et al., 2021](#)). While the methodology may appear linear, with a strong separation between the production of qualitative and quantitative data, this was not the case. In the methodology described, the workshop was built to integrate some inputs data that are directly asked during the workshop. In this sense, the mixed-method can be described as partially integrative ([Cheong et al., 2011](#)). However, other parts of the methodology were not integrative in this way. For example, we can cite additional content expressed by the participants or additional contents needed to produce a consistent and robust image. These must be integrated retrospectively, raising the question of compatibility between certain elements of the storyline and model inputs ([Elsawah et al., 2020](#)). The iterative process of translating storylines into modelling inputs, and then revisiting and adjusting the storylines based on the input work, remains underexplored in the literature

Another reason of the iterative process between storylines and inputs data lies in the objective of emphasising the differentiation between the various images that have been created following the same methodology ([Delmotte et al., 2017](#)). To be able to present to stakeholder various visions of future, each raising distinct questions and assumptions, it was necessary to amplify the differences. This was particularly important during the modelling phase, where input variables have a strong impact on how storylines evolved throughout the iterative process. Such differentiation also enables the quantification of multiple future scenarios, thereby enriching the exploration of plausible trajectories and their implications.

## 6. Conclusion

This paper offers a new attempt to clarify and improve transparency in the translation of stakeholders' statements into robust and consistent future image. It also highlights how the robustness and plausibility of an image can be strengthened to ensure it is realistic and meaningful both for stakeholders and within academic research. Although the translation process remains delicate and prone to misinterpretation, a more iterative approach involving stakeholders could mitigate such risks. However, due to the frugal approach adopted in this study, such iteration was not feasible. It is essential to underscore this limitation while reaffirming the central role of participation in the methodology.

Using a single, continuous example throughout the scenario development process helped clarify the stages of transformation. Yet, this method demands constant critical reflection, even on assumptions that may seem self-evident. Developing a detailed and consistent storyline is a necessary step for creating input data. While not all parameters from the storyline are used to build model inputs, this narrative foundation is vital for anchoring the scenario in broader social, political, and environmental contexts. Modelling provides a complementary means of testing the plausibility of the envisioned future by assessing what changes are feasible within the agro-hydrological system. However, these model outputs must remain closely connected to the storyline to ensure consistency.

Future improvements could include deeper exploration of all variables proposed by stakeholders and greater effort to collect detailed information from the outset of the participatory process, enabling better integration of initial inputs into the final storyline

## Bibliography

- Agami, N. M. E., Omran, A. M. A., Saleh, M. M., & El-Shishiny, H. E. E. D. (2008). An enhanced approach for trend impact analysis. *Technological forecasting and social change*, 75(9), 1439-1450.
- Alcamo, J. (Ed.). (2008). *Environmental futures: the practice of environmental scenario analysis*. Elsevier.
- Allain, S., Plumecocq, G., & Leenhardt, D. (2020). Linking deliberative evaluation with integrated assessment and modelling: A methodological framework and its application to agricultural water management. *Futures*, 120, 102566.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for sustainable development*, 35(3), 869-890.
- Beck, M. (2018). Telling stories with models and making policy with stories: an exploration. *Climate policy*, 18(7), 928-941.
- Bengston, D. N. (2016). The futures wheel: A method for exploring the implications of social-ecological change. *Society & Natural Resources*, 29(3), 374-379.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., & Hergert, G. W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy journal*, 107(6), 2449-2474.
- Bou Nassar, J. A., Malard, J. J., Adamowski, J. F., Ramírez Ramírez, M., Medema, W., & Tuy, H. (2021). Multi-level storylines for participatory modeling–involving marginalized communities in Tz'oløj Ya', Mayan Guatemala. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1283-1306.
- Bourgeois, R., Penunia, E., Bisht, S., & Boruk, D. (2017). Foresight for all: Co-elaborative scenario building and empowerment. *Technological Forecasting and Social Change*, 124, 178-188.
- Brown, C., Holzhauer, S., Metzger, M. J., Paterson, J. S., & Rounsevell, M. (2018). Land managers' behaviours modulate pathways to visions of future land systems. *Regional Environmental Change*, 18, 831-845.
- Brooker, R. W., Pakeman, R. J., Adam, E., Banfield-Zanin, J. A., Bertelsen, I., Bickler, C. & Karley, A. J. (2024). Positive effects of intercrop yields in farms from across Europe depend on rainfall, crop composition, and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(4), 35.
- Cairns, G., Ahmed, I., Mullett, J., & Wright, G. (2013). Scenario method and stakeholder engagement: Critical reflections on a climate change scenarios case study. *Technological forecasting and Social change*, 80(1), 1-10.
- Calleo, Y., & Pilla, F. (2023). Delphi-based future scenarios: a bibliometric analysis of climate change case studies. *Futures*, 149, 103143.
- Carlsen, H., Klein, R. J., & Wikman-Svahn, P. (2017). Transparent scenario development. *Nature Climate Change*, 7(9), 613-613.
- Cheong, S.-M., Brown, D. G., Kok, K., and Lopez-Carr, D. (2011). Mixed methods in land change research: towards integration. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 37(1), 8–12.
- Coletta, V. R., Pagano, A., Pluchinotta, I., Fratino, U., Scricciu, A., Nanu, F., & Giordano, R. (2021). Causal Loop Diagrams for supporting Nature Based Solutions participatory design and performance assessment. *Journal of Environmental Management*, 280, 111668.
- Cook, C. N., Inayatullah, S., Burgman, M. A., Sutherland, W. J., & Wintle, B. A. (2014). Strategic foresight: how planning for the unpredictable can improve environmental decision-making. *Trends in ecology & evolution*, 29(9), 531-541.
- Delmotte, S., Couderc, V., Mouret, J. C., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J. M., & Hossard, L. (2017). From stakeholders narratives to modelling plausible future agricultural systems. Integrated assessment of scenarios for Camargue, Southern France. *European Journal of Agronomy*, 82, 292-307.

- Elsawah, S., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Rothman, D., Schweizer, V., Trutnevyyte, E., & van Delden, H. (2020a). Scenario processes for socio-environmental systems analysis of futures: a review of recent efforts and a salient research agenda for supporting decision making. *Science of the Total Environment*, 729, 138393.
- Elsawah, S., Filatova, T., Jakeman, A. J., Kettner, A. J., Zellner, M. L., Athanasiadis, I. N. & Lade, J. (2020b). Eight grand challenges in socio-environmental systems modeling. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 2, 16226.
- Enthoven, L., & Van den Broeck, G. (2021). Local food systems: Reviewing two decades of research. *Agricultural systems*, 193, 103226.
- Ernst, A., Biss, K. H., Shamon, H., Schumann, D., & Heinrichs, H. U. (2018). Benefits and challenges of participatory methods in qualitative energy scenario development. *Technological Forecasting and Social Change*, 127, 245-257.
- Hattori, M., & Oaksford, M. (2007). Adaptive non-interventional heuristics for covariation detection in causal induction: Model comparison and rational analysis. *Cognitive science*, 31(5), 765-814.
- Hildreth, P. (2011). What is localism, and what implications do different models have for managing the local economy?. *Local Economy*, 26(8), 702-714.
- Hogan, A., & Lockie, S. (2013). The coupling of rural communities with their economic base: agriculture, localism and the discourse of self-sufficiency. *Policy Studies*, 34(4), 441-454.
- Houet, T., Marchadier, C., Bretagne, G., Moine, M. P., Aguejjad, R., Viguié, V., Masson, V. (2016). Combining narratives and modelling approaches to simulate fine scale and long-term urban growth scenarios for climate adaptation. *Environmental Modelling & Software*, 86, 1-13.
- Hughes, N. (2013). Towards improving the relevance of scenarios for public policy questions: A proposed methodological framework for policy relevant low carbon scenarios. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4), 687-698.
- Gantar, D. (2009). Application of Markov chain method for landscape scenario building. *Urbani izziv*, 20(1), 209-219.
- Garb, Y., Pulver, S., & VanDeveer, S. D. (2008). Scenarios in society, society in scenarios: toward a social scientific analysis of storyline-driven environmental modeling. *Environmental Research Letters*, 3(4), 045015.
- Geels, F. W., Berkhout, F., & Van Vuuren, D. P. (2016). Bridging analytical approaches for low-carbon transitions. *Nature climate change*, 6(6), 576-583.
- Geels, F. W. (2020). Micro-foundations of the multi-level perspective on socio-technical transitions: Developing a multi-dimensional model of agency through crossovers between social constructivism, evolutionary economics and neo-institutional theory. *Technological Forecasting and Social Change*, 152, 119894.
- Gray, J. (2009). Rurality and rural space: the 'policy effect' of the Common Agricultural Policy in the Borders of Scotland. *Tracking Rural Change*, 15.
- Groves, D. G., & Lempert, R. J. (2007). A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Global Environmental Change*, 17(1), 73-85.
- Fortes, P., Alvarenga, A., Seixas, J., & Rodrigues, S. (2015). Long-term energy scenarios: Bridging the gap between socio-economic storylines and energy modeling. *Technological Forecasting and Social Change*, 91, 161-178.
- Illakowhhi, D. T., Vegi, M. R., & Srivastava, B. B. L. (2024). Phosphorus' future insecurity, the horror of depletion, and sustainability measures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(14), 9265-9280.
- Jahel, C., Bourgeois, R., Bourgoin, J., De Lattre-Gasquet, M., Delay, E., Dumas, P., & Prudhomme, R. (2023). The future of social-ecological systems at the crossroads of quantitative and qualitative methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 193, 122624.
- Jetter, A. J., & Kok, K. (2014). Fuzzy Cognitive Maps for futures studies—A methodological assessment of concepts and methods. *Futures*, 61, 45-57.
- Kok, K., Rothman, D. S., & Patel, M. (2006). Multi-scale narratives from an IA perspective: Part I. European and Mediterranean scenario development. *Futures*, 38(3), 261-284.

- Kok, K., van Vliet, M., Bärlund, I., Dubel, A., & Sendzimir, J. (2011). Combining participative backcasting and exploratory scenario development: experiences from the SCENES project. *Technological forecasting and social change*, 78(5), 835-851.
- Kosow, H. (2015). New outlooks in traceability and consistency of integrated scenarios. *European Journal of Futures Research*, 3, 1-12.
- Kosow, H. (2016). The best of both worlds?: An exploratory study on forms and effects of new qualitative-quantitative scenario methodologies.
- Kunseler, E. M., Tuinstra, W., Vasileiadou, E., & Petersen, A. C. (2015). The reflective futures practitioner: Balancing salience, credibility and legitimacy in generating foresight knowledge with stakeholders. *Futures*, 66, 1-12.
- Laaha, G., Engeland, K., Tallaksen, L. M., & Sauquet, E. (2024). Regionalisation procedures estimation at the ungauged site. In *Hydrological Drought* (pp. 363-425). Elsevier.
- Ladin, C., & Berriet-Solliec, M. (2023). Understanding rural development policies: a proposal for a typology of the seven main policy repertoires in Europe and locally, based on French case studies. *The Annals of Regional Science*, 71(1), 121-144.
- Law, J. (2007). Actor network theory and material semiotics, version of 25th April 2007. *Companion to social theory*.
- Mahmoud, M., Liu, Y., Hartmann, H., Stewart, S., Wagener, T., Semmens, D. & Winter, L. (2009). A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software*, 24(7), 798-808.
- Mallampalli, V. R., Mavrommati, G., Thompson, J., Duveneck, M., Meyer, S., Ligmann- Zielinska, A., & Borsuk, M. E. (2016). Methods for translating narrative scenarios into quantitative assessments of land use change. *Environmental Modelling & Software*, 82, 7-20.
- Mehryar, S., Sliuzas, R., Schwarz, N., Sharifi, A., & Van Maarseveen, M. (2019). From individual Fuzzy Cognitive Maps to Agent Based Models: Modeling multi-factorial and multi-stakeholder decision-making for water scarcity. *Journal of environmental management*, 250, 109482.
- Mora, O., Le Mouél, C., de Lattre-Gasquet, M., Donnars, C., Dumas, P., Réchauchère, O. & Marty, P. (2020). Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. *PloS one*, 15(7), e0235597.
- Morandi, F., Perrin, A., & Østergård, H. (2016). Miscanthus as energy crop: Environmental assessment of a miscanthus biomass production case study in France. *Journal of Cleaner Production*, 137, 313-321.
- Morgan, M. S. (2012). *The world in the model: How economists work and think*. Cambridge University Press.
- Parson, E. A. (2008). Useful global-change scenarios: current issues and challenges. *Environmental Research Letters*, 3(4), 045016.
- Poux, X., & Aubert, P. M. (2018). An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise, Iddri-ASCA Study, 9, 18.
- Prager, S. D., & Wiebe, K. (2021). Strategic foresight for agriculture: Past ghosts, present challenges, and future opportunities. *Global Food Security*, 28, 100489.
- Riera, A., Duluins, O., Antier, C., & Baret, P. V. (2025). Which types of quantitative foresight scenarios to frame the future of food systems? A review. *Agricultural Systems*, 225, 104270.
- Rinaudo, J. D., Maton, L., Terrason, I., Chazot, S., Richard-Ferroudji, A., & Caballero, Y. (2013). Combining scenario workshops with modeling to assess future irrigation water demands. *Agricultural Water Management*, 130, 103-112.
- Robertson, E., O'Grady, Á., Barton, J., Galloway, S., Emmanuel-Yusuf, D., Leach, M., & Foxon, T. (2017). Reconciling qualitative storylines and quantitative descriptions: an iterative approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 118, 293-306.
- Rottman, B. M., & Hastie, R. (2014). Reasoning about causal relationships: Inferences on causal networks. *Psychological bulletin*, 140(1), 109.
- Rounsevell, M. D. A., Ewert, F., Reginster, I., Leemans, R., & Carter, T. R. (2005). Future scenarios of

- European agricultural land use: II. Projecting changes in cropland and grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107(2-3), 117-135.
- Rounsevell, M. D., & Metzger, M. J. (2010). Developing qualitative scenario storylines for environmental change assessment. *Wiley interdisciplinary reviews: climate change*, 1(4), 606-619.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.
- Saujot, M., Le Gallic, T., & Waismann, H. (2020). Lifestyle changes in mitigation pathways: policy and scientific insights. *Environmental Research Letters*, 16(1), 015005.
- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., & Pisante, M. (2017). Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4, 1-13.
- Stiglitz, J. E. (2012). The price of inequality.
- Stürck, J., Levers, C., van der Zanden, E. H., Schulp, C. J. E., Verkerk, P. J., Kuemmerle, T., Verburg, P. (2018). Simulating and delineating future land change trajectories across Europe. *Regional Environmental Change*, 18, 733-749.
- Tapinos, E. (2012). Perceived environmental uncertainty in scenario planning. *Futures*, 44(4), 338-345.
- Tribouillois H, Constantin J, Casal L., Villerd J., Therond O., 2022. Introducing and expanding cover crops at the watershed scale: impact on water flows. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Trutnevyte, E., Barton, J., O'Grady, Á., Ogunkunle, D., Pudjianto, D., & Robertson, E. (2014). Linking a storyline with multiple models: a cross-scale study of the UK power system transition. *Technological Forecasting and Social Change*, 89, 26-42.
- Tully, K., & Ryals, R. (2017). Nutrient cycling in agroecosystems: Balancing food and environmental objectives. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41(7), 761-798.
- Van Asselt, M., & van't Klooster, S. (2012). *Foresight in action: developing policy-oriented scenarios*. Routledge.
- van Bruggen, A., Nikolic, I., & Kwakkel, J. (2019). Modeling with stakeholders for transformative change. *Sustainability*, 11(3), 825.
- Van Der Steen, M., & Van Twist, M. (2012). Beyond use: Evaluating foresight that fits. *Futures*, 44(5), 475-486.
- van't Klooster, S. A., & van Asselt, M. B. (2006). Practising the scenario-axes technique. *Futures*, 38(1), 15-30.
- Van't Klooster, S. A., Cramer, T., & van Asselt, M. B. A. (2024). Foresight in action: A longitudinal study based on a 25-year journey in the world of policy-oriented foresight. *Futures*, 155, 103294.
- van Leeuwen, C., Sgubin, G., Bois, B., Ollat, N., Swingedouw, D., Zito, S., & Gambetta, G. A. (2024). Climate change impacts and adaptations of wine production. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(4), 258-275.
- van Vliet, M., Kok, K., & Veldkamp, T. (2010). Linking stakeholders and modellers in scenario studies: The use of Fuzzy Cognitive Maps as a communication and learning tool. *Futures*, 42(1), 1-14.
- Villa, F., Balbi, S., Athanasiadis, I. N., & Caracciolo, C. (2017). Semantics for interoperability of distributed data and models: Foundations for better-connected information. *F1000Research*, 6, 686.
- Volkery, A., Ribeiro, T., Henrichs, T., & Hoogeveen, Y. (2008). Your vision or my model? Lessons from participatory land use scenario development on a European scale. *Systemic Practice and Action Research*, 21, 459-477.
- Voß, J. P., & Bornemann, B. (2011). The politics of reflexive governance: challenges for designing adaptive management and transition management. *Ecology and society*, 16(2).
- Walling, E., & Vaneechaute, C. (2020). Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. *Journal of Environmental Management*, 276, 111211.
- Walton, S., O'Kane, P., & Ruwhiu, D. (2019). Developing a theory of plausibility in scenario building:

- Designing plausible scenarios. *Futures*, 111, 42-56.
- Weimer-Jehle, W., Buchgeister, J., Hauser, W., Kosow, H., Naegler, T., Poganietz, W. R., & Vögele, S. (2016). Context scenarios and their usage for the construction of socio-technical energy scenarios. *Energy*, 111, 956-970.
- Weimer-Jehle, W., Vögele, S., Hauser, W., Kosow, H., Poganietz, W. R., & Prehofer, S. (2020). Socio-technical energy scenarios: state-of-the-art and CIB-based approaches. *Climatic change*, 162, 1723-1741.
- Wright, G., & Cairns, G. (2011). *Scenario thinking: Practical approaches to the future*. Springer.
- Wright, G., Bradfield, R., & Cairns, G. (2013). Does the intuitive logics method—and its recent enhancements—produce “effective” scenarios?. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4), 631-642.

## Conclusion du chapitre

Cet article se concentre sur l'exemple de l'agriculture agroécologique à visée d'autonomie locale, l'une des quatre images développées. Les pages suivantes présentent les trois autres récits ainsi que les cartes associées, permettant de visualiser la spatialisation propre à chaque image et la manière dont ces représentations ont été traduites en données d'entrées en vue de leur modélisation.

Pour chaque image produite, la méthodologie adoptée a suivi les mêmes étapes que celles décrites dans l'article. Chaque travail de groupe a d'abord fait l'objet d'un exercice de collecte et d'analyse des verbatims, ainsi que des productions réalisées en atelier (cartes, tableaux, etc.). Les différentes étapes, détaillées dans l'article principal, ont ensuite été appliquées à chacun des groupes. À l'instar de l'image de l'agriculture agriculture agroécologique à visée d'autonomie locale présentée dans l'article, un travail similaire de positionnement par rapport à des critères normatifs a été réalisé après l'atelier en interne. La Figure 50 illustre cet auto-positionnement sur une échelle qui évalue la complétude du matériel fourni par les participants lors de l'atelier.

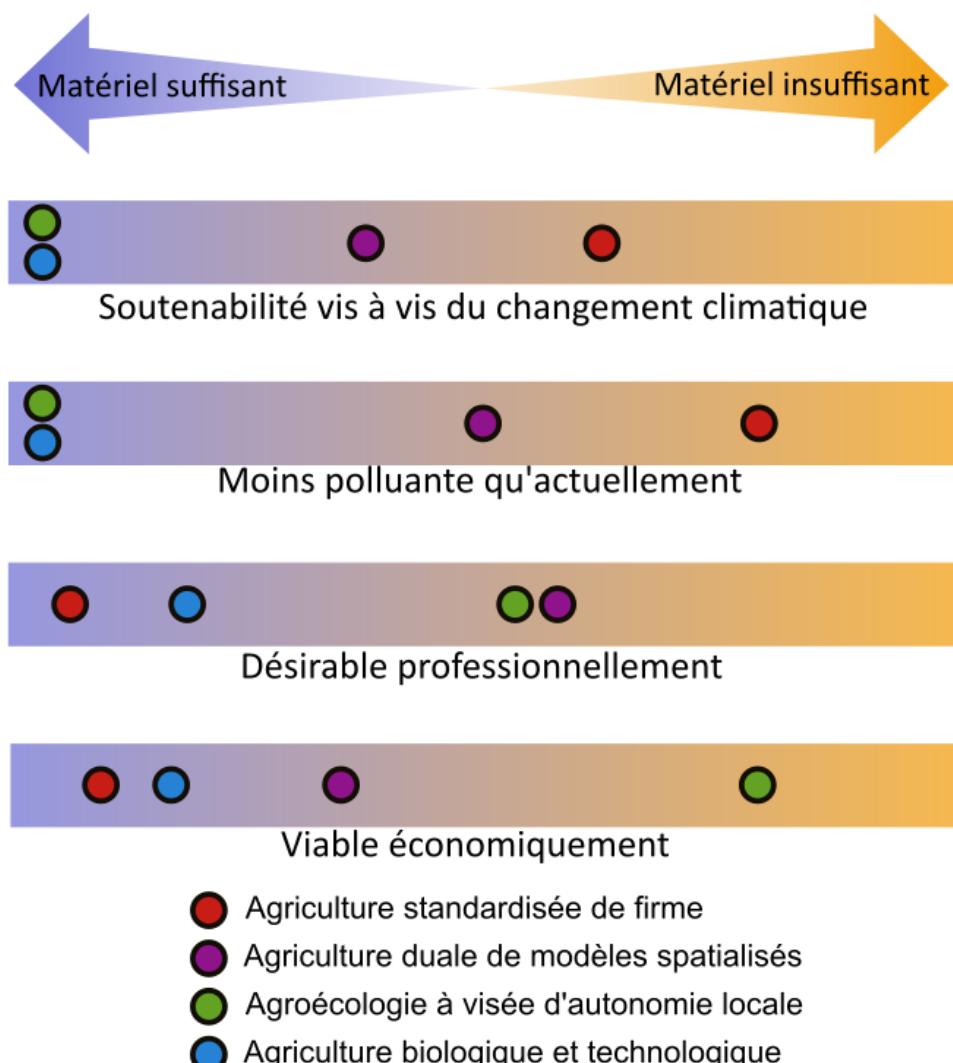
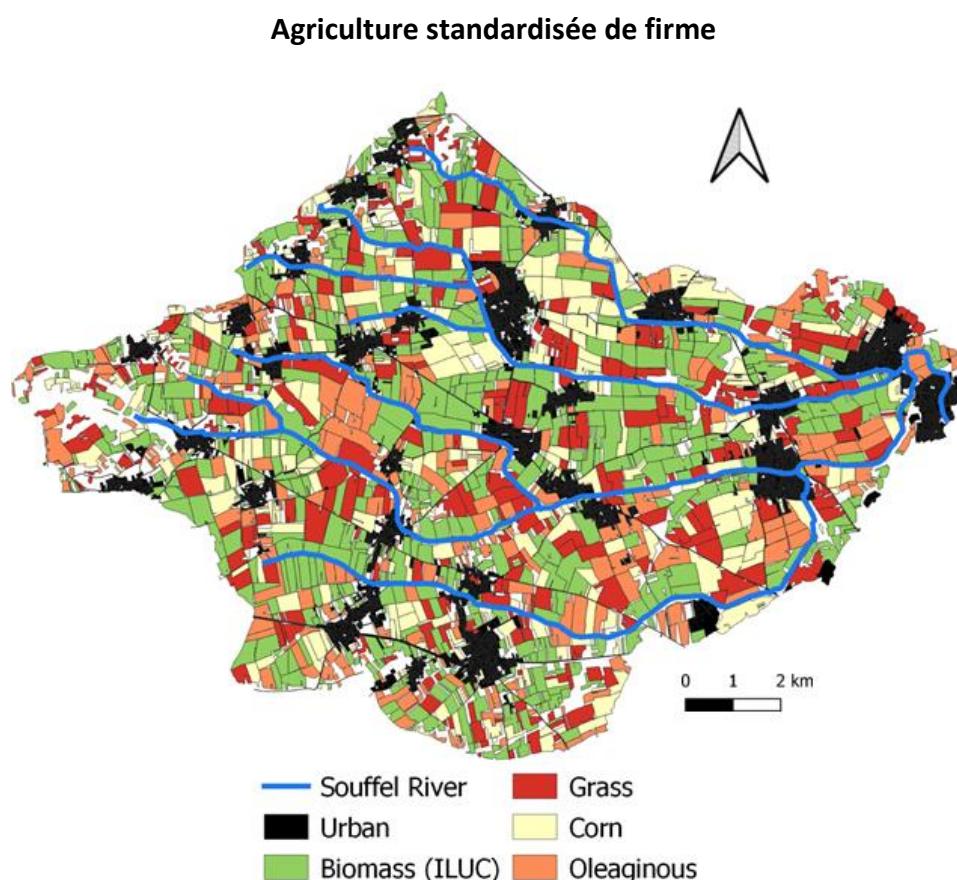


Figure 50. Auto-positionnement des images en fonction des critères normatifs initialement donnés aux participants.

La figure met en évidence l'hétérogénéité du matériel produit en fonction des groupes, mais aussi selon les critères normatifs. Chaque image nécessite un travail complémentaire d'ajustement interne visant à améliorer la cohérence et la robustesse du récit, ainsi qu'un apport supplémentaire de la part de l'équipe de recherche pluridisciplinaire pour consolider l'image. Plus une image s'éloigne de la réalité actuelle, notamment lorsqu'elle explore des dimensions liées à la résilience face au changement climatique ou à la réduction des pollutions biogéochimiques, plus il est difficile dans le temps contraint des ateliers de produire un contenu suffisant, en particulier pour les critères de désirabilité professionnelle et de viabilité économique (cf. image 3 dans l'article).

En revanche, cette figure ne rend pas compte du degré de transformation systémique impliqué par les propositions des participants. Elle ne permet pas d'évaluer si les idées exprimées relèvent de véritables ruptures structurelles ou de simples verdissements qui sont des ajustements du système existant, ce qui est le cas pour l'image 1 et 2 par exemple ([Lamine, 2011](#)). Cette différence entre écologisation et verdissement est davantage visible à travers les résultats de modélisation. Il devient alors intéressant de comparer les résultats de simulations au regard des critères normatifs, en distinguant les images qui s'inscrivent dans le paradigme actuel, à différentes échelles, de celles qui impliquent des changements structurels profonds.

On présente ci-après les trois autres images (récits) produites à partir des dires d'acteurs lors des ateliers, en complément de celle présentée dans l'article. Chaque récit est accompagné d'une carte de spatialisation, construite selon la même méthode que celle figurant dans l'article, afin d'illustrer la spatialisation et le système agricole associé à chaque image (Figure 51, Figure 52 et Figure 53).



*Figure 51. Spatialisation du territoire en 2070 de l'image agriculture standardisée de firme.*

En 2070, les parcelles agricoles appartiennent majoritairement à des firmes agro-industrielles intégrées détenant également les moyens de transformation des produits agricoles sur l'ensemble du territoire français. Elles sont spécialisées dans des systèmes de culture particuliers et mettent en œuvre des conduites culturales simplifiées du fait de la taille conséquente des exploitations (de 80 ha en moyenne). Sur le territoire de la Souffel, on trouve trois productions principales à destination de la consommation humaine (huile de tournesol, farine de triticale et maïs), ainsi que des couverts végétaux (moutarde, trèfle et avoine) destinés à la production énergétique. Les denrées de consommation humaine sont vendues sur le marché international. Les emplois du secteur agricole sont majoritairement de type salarial, à l'instar d'autres secteurs industriels. Une partie des employés sont des techniciens du fait de l'utilisation très répandue de la technologie (équipements automatisés et outils d'agriculture de précision). Ce modèle est soutenu par l'État en raison de sa compétitivité économique et de son intégration à la logique du marché agricole mondial. La régulation porte essentiellement sur la qualité sanitaire des produits commercialisés, via des cahiers des charges à respecter. Les firmes sont aussi efficaces sur le plan énergétique du fait des économies d'échelle réalisées. L'accès aux ressources nécessaires à la production est restreint par leur disponibilité : les engrains de synthèse se sont raréfiés, ce qui oblige les firmes à recourir à des couverts piéges à nitrate, valorisés énergétiquement ; la disponibilité de l'eau varie en fonction des années, ce qui pousse à choisir des cultures qui requièrent moins d'eau. La relation avec les habitants est ambivalente : si une partie est employée par les firmes, la majorité subit les risques et les nuisances liés aux activités agricoles, notamment le recours aux pesticides ; les tensions sont exacerbées par l'absence de lien commercial direct entre ces habitants et les firmes et par l'éloignement des décideurs.

#### Agriculture duale de modèles agricoles spatialisés

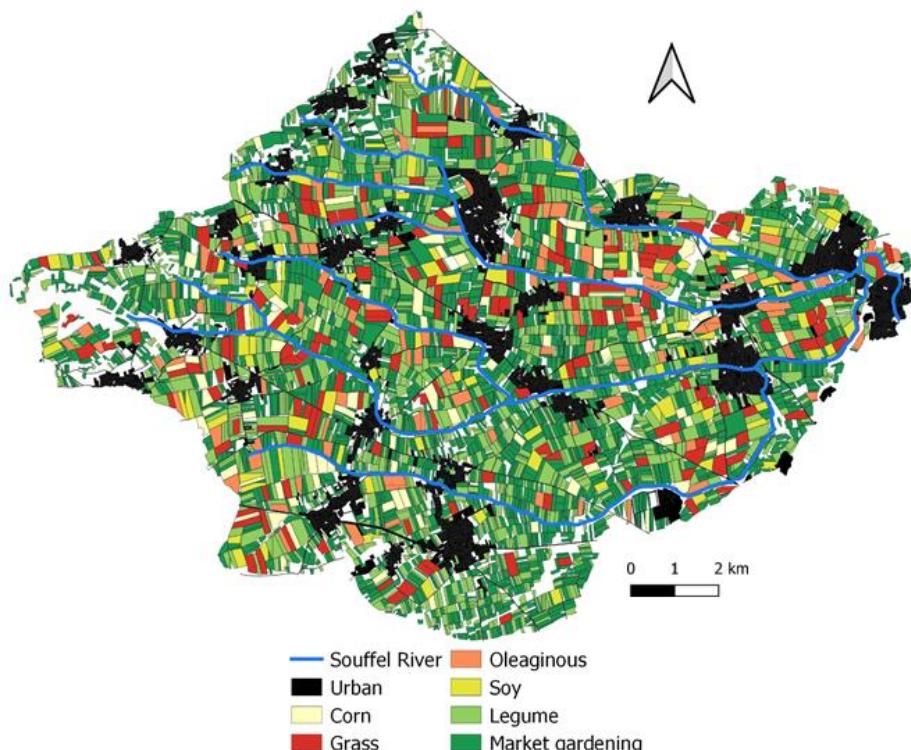


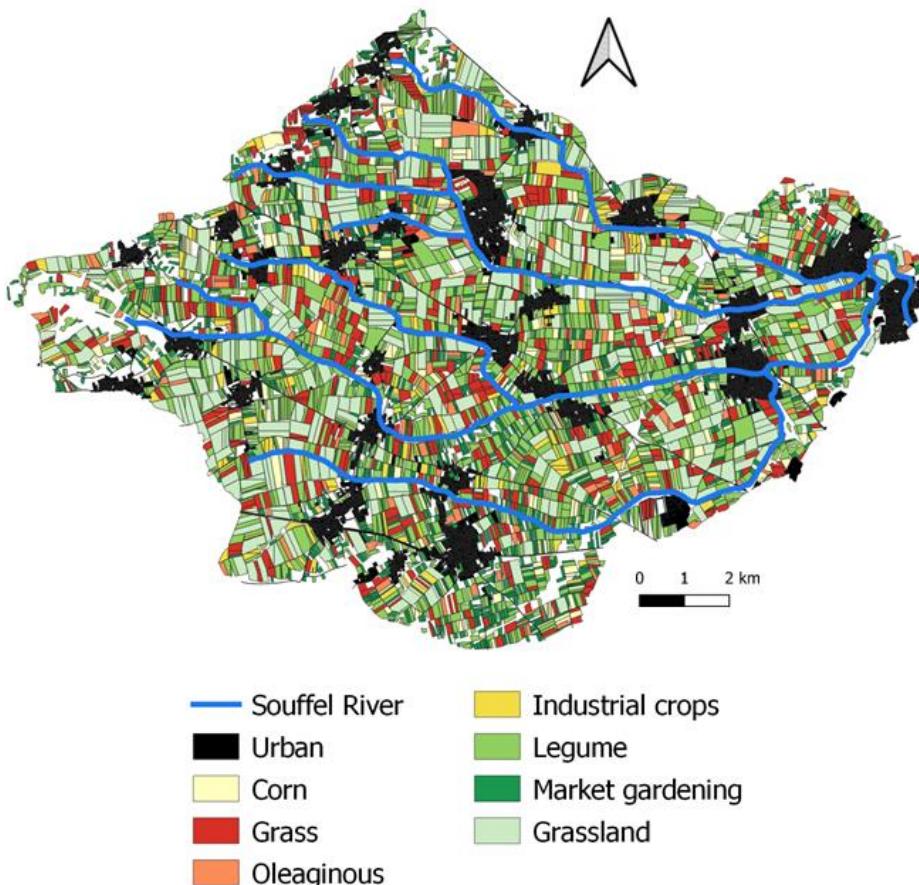
Figure 52. Spatialisation du territoire en 2070 de l'image agriculture duale de modèles agricoles spatialisés.

En 2070, sur le territoire de la Souffel, comme dans beaucoup de zones péri-urbaines, les populations ont augmenté du fait d'un exode urbain. En effet, les grandes villes sont devenues des espaces moins viables car les effets du changement climatique y sont davantage ressentis (îlots de chaleur urbain, peu d'ombrage, inondation...). Cette mutation engendre des tensions et des conflits entre les nouveaux habitants et les agriculteurs engagés dans les pratiques conventionnelles. Dans un contexte de décentralisation de la politique agricole, les Régions ont adopté une politique spatialisée de l'agriculture entre deux modèles agricoles divergents. Le premier est constitué de petites exploitations dont les produits sont destinés à la consommation locale ; elles sont caractéristiques d'une agriculture familiale et situées préférentiellement à proximité des lieux d'habitation. Le second modèle est celui des grandes exploitations exportant majoritairement leurs productions, qui fonctionnent également sur un modèle familial, mais avec un recours important à des ouvriers salariés. Si le matériel agricole reste largement mutualisé entre les différentes exploitations de tailles similaires, les nouvelles technologies sont assez peu mobilisées par la profession. Au niveau national, plusieurs mesures ciblant les pollutions directes ont été prises et d'importantes subventions visent à encourager les pratiques biologiques ou bas niveau d'impact (BNI) dans les parcelles proches des lieux d'habitation. Cela permet de créer du lien entre les habitants et les agriculteurs des petites exploitations, mais aussi d'augmenter la demande en produits locaux. En parallèle, les pouvoirs publics locaux favorisent la consommation locale et agissent directement sur les débouchés : cantines, ticket paysan... Les autres zones cibles par les subventions Bio/BNI sont les parcelles proches des cours d'eau et des aires d'alimentation de captage afin de limiter la pollution diffuse et de recréer une connexion sociale aux rivières, avec en particulier l'aménagement de circuits de promenade. Ces mesures sont financées en partie par des taxes sur les grandes exploitations qui continuent de générer des risques et des nuisances et d'utiliser fortement les pesticides, ce qui est toléré socialement grâce à leur éloignement des habitations.

---

### **Agriculture biologique et technologique**

En 2070, l'agriculture n'utilise plus d'intrants de synthèse, devenus trop coûteux. Ils sont remplacés par un fort recours aux technologies et une redécouverte des expertises agroécologiques locales sur l'ensemble du territoire européen. Deux systèmes cohabitent sur le territoire de la Souffel et plus généralement en Europe, afin de répondre à deux objectifs européens : la protection de l'environnement et le maintien de la compétitivité entre les exploitations. D'une part, de grandes exploitations en polyculture-élevage, disposant de prairies permanentes et de parcelles combinant production fourragère et grandes cultures, qui sont conduites par des agriculteurs à temps plein. D'autre part, de petites exploitations en atelier maraîchage, conduites par des agriculteurs doubles actifs qui travaillent également dans le tourisme ainsi que dans la transformation et la vente de produits agricoles. Toutes les parcelles sont systématiquement couvertes, les rotations sont longues et les cultures choisies pour maximiser les synergies, tout en étant adaptées aux conditions locales afin de minimiser l'irrigation. Néanmoins, l'élevage des bovins et le maraîchage sont des productions gourmandes en eau. L'usage de la technologie (automates, outils d'agriculture de précision, robotique et satellites et drones autonomes) est systématique et remplace notamment les pesticides (pour l'arrachage des adventices, contrer les attaques des ravageurs...). Le métier d'agriculteur est profondément modifié et une grande partie des agriculteurs se spécialisent



*Figure 53. Spatialisation du territoire en 2070 de l'image agriculture biologique et technologique.*

dans les nouvelles technologies, ce qui modifie également les formations et l'attractivité du métier. Ces mutations profondes sont guidées par la PAC, dont le paradigme a complètement changé après une explosion du nombre de maladies liées aux pesticides et la chute drastique de la biodiversité et donc des services écosystémiques rendus aux agrosystèmes au milieu du siècle. La politique agricole favorise désormais la diversification des cultures, le non recours aux intrants de synthèse et la recherche agronomique et technologique pour soutenir la productivité. Le recours aux intrants de synthèse est fortement contrôlé et sévèrement réprimé. La fin des risques et des nuisances liées à l'épandage des pesticides et des engrains entraîne une diminution des conflits dans les territoires péri-urbains. De plus, la diversification des cultures encourage les ventes en circuit court, à des prix rémunérateurs, ce qui renforce les liens entre habitants et agriculteurs, mais également entre les métropoles et les zones péri-urbaines.

---

Les images produites présentent une grande diversité, tant dans les récits qui les accompagnent que dans leurs spatialisations. Cette diversité résulte à la fois du travail initial de chaque groupe de participants et d'un choix délibéré de l'équipe de recherche qui vise à renforcer le contraste entre les quatre images. Comme évoqué brièvement dans l'article, l'objectif est de proposer des futurs contrastés, permettant aux participants de se projeter dans des mondes différents et d'explorer des alternatives en fonction des conditions définies dans ces scénarios ([van Vliet & Kok, 2015](#) ; [Elsawah et al., 2020](#)). Certaines images présentent des ruptures plus marquées avec le modèle agricole actuel, notamment par des transformations structurelles du paysage : réduction de la taille des exploitations et des

parcelles, apparition d'éléments paysagers tels que haies, arbres ou talus. Ces éléments sont fréquemment évoqués par les participants, mais ne peuvent pas être pris en compte dans la modélisation, car non intégrés aux modèles utilisés. En particulier, les effets de ces structures sur la lixiviation des molécules ou sur la croissance des végétaux liée à la réduction du stress thermique (pour les images mettant en avant l'agroforesterie) ne sont pas pris en compte. D'autres marqueurs, comme la présence de zones tampons ou la différenciation des systèmes agricoles à travers la taille des parcelles, ne sont pas non plus modélisables même s'ils sont visibles dans les figures présentées.

La diversité des récits peut être caractérisée à partir de différentes variables de différenciation, comme par exemple celles présentées dans le Tableau 15:

- l'échelon décisionnaire structurant, influençant les futurs modes de vies adoptés.
- le recours aux intrants, notamment les engrais (minéraux et organiques) et les pesticides. Leur usage est encadré selon différents régimes de régulations (limitation par disponibilité, par décision publique, par inutilité ou interdiction totale).
- l'usage des ressources communes, en particulier illustré par la gestion de l'eau pour l'irrigation dans les images produites, qui varie selon les logiques du socio-agro-hydro système : usage restreint, usage étalé ou utilisation ciblée en lien avec une logique de consommation locale.

*Tableau 15. Critères de différenciation des quatre images co-construites.*

	Agriculture standardisée de firme	Agriculture duale de modèles spatialisés	Agroécologie à visée d'autonomie locale	Agriculture biologique et technologique
Echelon décisionnaire structurant	Etat	Régions	Europe (financement) Communauté de communes (gestion)	Europe
Utilisation d'intrants de synthèse	Limitée par leur disponibilité	Limitée par les pouvoirs publics	Nulle (pas nécessaire)	Nulle (interdiction)
Consommation d'eau	Modérée (assolements moins gourmands)	Importante (maraîchage)	Importante (maraîchage)	Conséquente (élevage et maraîchage)
Exportations	Quasi-totalité des produits transformés	Les productions issues des grandes exploitations	Absente, consommation locale	Limitée, bovins de qualité et maraîchage consommés localement
Distribution et taille des exploitations	Homogène, grandes (de plus de 80 ha)	Hétérogène, entre petites (<5 ha) et moyennes (30 à 50 ha)	Homogène, petites (<5 ha)	Hétérogène, entre petites (<5 ha) et moyennes (30 à 50 ha)
Relations entre agriculteurs et riverains	Conflictuelles	Apaisées	Collaboratives	Apaisées

- la destination des productions agricoles, majoritairement destinées à l'exportation ou orientées partiellement ou totalement vers une consommation locale.

Bien qu'elles présentent des divergences marquées, les images partagent certains éléments communs. Par exemple, la question des solutions technologiques émerge dans deux des quatre images. Dans l'image **Agriculture standardisée de firme**, les technologies existantes sont généralisées à l'ensemble du système, sans projection dans des innovations futures. À l'inverse, l'image **Agriculture biologique et technologique** fait le pari de robots agricoles permettant de compenser l'absence de pesticides, notamment dans les grandes exploitations. Ce qui distingue cette image, c'est la coexistence de fermes à haute intensité technologique avec des exploitations de plus petite taille, non technologisées, mais tout de même viables économiquement et attractives professionnellement. La place accordée à la technologie qu'elle soit intégrée, marginalisée ou absente est un point discuté dans l'ensemble des groupes de participants.

De même, les relations entre agriculteurs et riverains constituent un autre thème transversal, particulièrement abordé par les agriculteurs, déjà confrontés à des tensions sur le territoire. Les récits soulignent des conflits d'usage liés à l'eau ou aux nuisances générées par certaines pratiques agricoles (épandage, odeurs, bruit). Cette problématique est renforcée par la

*Tableau 16. Comparaison des images Trajectoire(s) et des scénarios ADEME selon les composantes clés de l'agrosystème.*

Scénarios ADEME	Images correspondantes Trajectoire(s)	Composante commune de l'agrosystème	Eléments spécifiques aux images du projet Trajectoire(s)
<b>Génération frugale</b>	<b>Agroécologie à visée d'autonomie locale</b>	Consommation locale ; réduction drastique viande ; bio largement majoritaire	
<b>Coopérations territoriales</b>	<b>Agriculture duale de modèles spatialisés</b>	50 % SAU en BIO; diminution de 50 % consommation de viande (remplacement par protéines végétales) par rapport à aujourd'hui ; croissance démographique hors métropoles ; dynamisme des marchés locaux	Ce modèle s'appuie sur la coexistence de deux modèles, l'un productiviste et fortement taxé qui permet de subventionner le second qui, lui est plus sobre en intrants et plus diversifié
<b>Technologies vertes</b>	<b>Agriculture biologique et technologique</b>	Pari sur les nouvelles technologies ; diminution de 70 % consommation de viande (remplacement par protéines végétales) par rapport à aujourd'hui	Articulation entre technosolutionnisme et régulation environnementale stricte, notamment via l'interdiction des pesticides et la généralisation de l'agriculture biologique
<b>Pari réparateur</b>	<b>Agriculture standardisée de firme</b>	Consommation de masse maintenue ; recours accru aux technologies ; agriculture intensive	La raréfaction des intrants entraîne une limitation physique de leur utilisation

situation géographique du territoire de la Souffel, en périphérie de Strasbourg. L'attractivité résidentielle de ces communes périurbaines, pour une population urbaine en quête d'un mode de vie alternatif, intensifie les enjeux de cohabitation entre habitants et agriculteurs. La démographie croissante de ces zones et l'arrivée de nouveaux habitants interroge la compatibilité entre modes de vie et pratiques agricoles existantes. En revanche, la question du conflit d'usage foncier lié à l'étalement urbain n'a pas été soulevée par les groupes.

Enfin, les quatre images s'inscrivent, à des degrés divers, dans des référentiels existants, comme ceux mis en place dans l'étude Transition(s) 2050 de l'ADEME ([2021](#)). Des correspondances sont observables concernant les caractéristiques des futurs agrosystèmes. Toutefois, certains éléments apparaissent comme plus originaux par rapport aux prospectives habituelles (Tableau 16).

Le rapprochement entre certaines images co-construites et des scénarios prospectifs préexistants souligne que, malgré des différences parfois marquées entre les futurs agricoles envisagés, des lignes directrices communes permettent de les regrouper en catégories typologiques. Cette observation rejoint la réflexion de Cairns et al. ([2016](#)), qui suggèrent l'intérêt de mobiliser des modèles de futurs prédéfinis dans des contextes de co-construction sous contrainte temporelle. Une telle approche permettrait de concentrer davantage le temps disponible sur la définition d'actions concrètes face à des problèmes complexes, tout en reconnaissant l'importance des étapes d'identification, d'analyse et de recadrage des enjeux opérées lors de la construction de l'image.

Adopter cette démarche offrirait une méthode plus frugale pour les équipes de recherche, tout en libérant du temps pour travailler sur la mise en œuvre de solutions. Cela implique également de mener un travail bibliographique approfondi, afin d'anticiper plus finement les boucles d'interactions sociales, environnementales, agricoles et économiques susceptibles de structurer les futurs agricoles.

## Références

- ADEME. Transition(s) 2050, choisir maintenant, agir pour le climat. 2021.
- Cairns, G., Wright, G., & Fairbrother, P. (2016). Promoting articulated action from diverse stakeholders in response to public policy scenarios: A case analysis of the use of 'scenario improvisation' method. *Technological Forecasting and Social Change*, 103, 97-108.
- Elsawah, S., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Rothman, D., Schweizer, V., Trutnevyyte, E. & van Delden, H. (2020). Scenario processes for socio-environmental systems analysis of futures: a review of recent efforts and a salient research agenda for supporting decision making. *Science of the Total Environment*, 729, 138393.
- Julien, P. A., Lamonde, P., & Latouche, D. (1975). La méthode des scénarios en prospective. *L'Actualité économique*, 51(2), 253-281.
- Lamine, C. (2011). Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *Journal of rural studies*, 27(2), 209-219.
- van Vliet, M., & Kok, K. (2015). Combining backcasting and exploratory scenarios to develop robust water strategies in face of uncertain futures. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 20, 43-74.



## Chapitre 5 : Modélisation agro-hydrologique dans une étude prospective : résultats, discussion et perspectives.

Dans le chapitre précédent, les quatre images élaborées avec les différentes parties prenantes, ainsi que la méthodologie employée, ont été présentées. Ces images ont ensuite été modélisées à l'aide d'outils agro-hydrologiques préexistants.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats de ces modélisations et de répondre à deux questions principales :

- Les images co-construites avec les acteurs locaux permettent-elles d'envisager des futurs adaptés au changement climatique et conformes aux critères normatifs définis, au regard des résultats de modélisation ?
- La mobilisation d'outils de modélisation préexistants permet-elle un gain de temps significatif dans le déploiement de la démarche sur un territoire donné ?

Les modèles utilisés, MAELIA et SWAT+, ont été choisis et présentés dans le premier chapitre, où une explication détaillée de leur fonctionnement a été fournie. La prise en main de ces modèles a exigé un investissement important en temps et en compétences, notamment en ce qui concerne la compréhension des hypothèses de modélisation et de l'organisation des différents modules, la préparation des jeux de données, ainsi que la calibration et la validation des résultats. Bien que ce travail de familiarisation ne soit pas décrit de manière exhaustive dans le manuscrit, il constitue une composante essentielle du travail doctoral réalisé qui a duré un peu plus d'un an. Ce processus peut être décomposé en quatre phases, impliquant des itérations régulières entre chacune d'elles : un temps d'acquisition des données d'entrée (environ quatre mois), un temps de formatage de ces données (environ trois mois), un temps de compréhension du fonctionnement du modèle (environ un mois) et enfin un temps de calibration et de validation (environ cinq mois). Par comparaison, le développement d'un tel modèle peut durer plusieurs années et est rarement développé dans le seul cadre d'une thèse.

Ce chapitre s'articule en plusieurs temps. Il commence par une série de rappels méthodologiques et des compléments relatifs à la paramétrisation, à la calibration et à la validation des modèles, spécifiques à chacun des outils utilisés. Dans un deuxième temps, les résultats sont présentés. Pour le modèle SWAT+, les résultats ont été produits dans le cadre de deux stages de fin d'études associés à cette thèse : celui de Romane Sillard, qui a paramétré le module hydrologique ([Sillard, 2022](#)), et celui de Manon Picot, qui a poursuivi le travail en générant les résultats hydro-agrologiques en s'appuyant sur les quatre images construites dans ce travail de thèse avec les acteurs locaux ([Picot, 2024](#) ; [Picot et al., 2024](#)). La troisième partie discute les principaux résultats au regard de la méthodologie et des problématiques initialement posées dans cette étude prospective.

L'objectif principal de ce chapitre est donc de présenter les résultats de simulation issus des modèles MAELIA et SWAT+, appliqués à l'échelle locale et alimentés par les quatre scénarios climatiques (cf. [chapitre 3, section 1.1](#)) et les quatre images construites avec les acteurs locaux (cf. [chapitre 4](#)). L'analyse se concentre sur deux variables de sortie de ces modèles :

- Le rendement agricole, considéré comme un indicateur de la résilience du système agricole face au changement climatique en termes agricole et économique.

Tableau 17. Variables de sortie présentées des modèles agro-hydrologiques MAELIA et SWAT+ dans cette étude.

Variables de sortie	MAELIA	SWAT +
Lixiviation azotée	X	X
Concentration en nitrates à l'exutoire	-	X
Concentration en S-métolachlore à l'exutoire	-	X
Rendement	X	X
Stress hydrique et azoté	X	-
Débit à l'exutoire	-	X

- La pollution agricole, évaluée via des indicateurs de lixiviation de nitrates, ainsi que des concentrations en nitrates et pesticides dans les eaux de surface.

En fonction des capacités des deux modèles, le Tableau 17 résume les variables de sorties mobilisées dans ce travail.

## 1. Rappels et compléments méthodologiques

Cette section présente les principales données d'entrée mobilisées pour produire les résultats de modélisation présentés dans la partie suivante. D'abord, des rappels et des compléments méthodologiques sont produits sur les différentes données d'entrées des modèles en fonction de leurs structures et spécificités (climat, sol et occupation du sol, agronomie, hydrologie). Ils concernent la modélisation du territoire actuel ainsi que la modélisation des images futures. Cette section détaille également l'étape de calibration des modèles.

### 1.1 Données d'entrée des modèles

#### *Données météorologiques et climatiques*

Les données météorologiques et les modèles climatiques sont respectivement mobilisés pour deux périodes distinctes : la période actuelle (2015–2023) et une période future centrée sur l'intervalle 2065–2075. À cette fin, deux jeux de données distincts sont utilisés pour forcer les modèles :

- Pour la période 2015–2023, les données météorologiques SAFRAN de MétéoFrance sont utilisées ([Habets et al., 2008](#)). Celles-ci ont été extraites spécifiquement sur la maille centrale (8 x 8 km) du bassin versant de la Souffel. Les mailles respectivement à l'ouest et à l'est ne couvrent en effet qu'une portion réduite du bassin versant (cf. figure 35). Les variables prises en compte incluent la température de l'air, la précipitation, l'évapotranspiration potentielle (ETP) ainsi que la vitesse du vent (cf. [chapitre 1, section 4.1](#)).
- Pour la période 2065–2075, les données climatiques reposent sur les scénarios narratifs d'Explore 2 : Aster, Dahlia, Euphorbe et Narcisse<sup>11</sup> ([Marson et al., 2024](#)). Le [chapitre 3](#) présente

<sup>11</sup> Pour rappel, au niveau national, les projections climatiques indiquent qu'Aster se caractérise par un fort réchauffement accompagné de contrastes saisonniers marqués en précipitations, Dahlia par un fort

en détail ces quatre scénarios climatiques ainsi que les hypothèses sous-jacentes (cf. [chapitre 3, section 1.1](#)). Il est important de noter que les tendances climatiques simulées localement sur le bassin versant de la Souffel diffèrent des tendances nationales.

Au niveau local, sur la même maille centrale ( $8 \times 8 \text{ km}$ ), on retrouve les tendances suivantes sur la période 2065-2075 dans la Figure 54 :

- En hiver, les quatre scénarios ne prévoient pas de modification significative de la quantité des précipitations. En revanche, une augmentation des températures maximales hivernales est anticipée : d'en moyenne environ  $+1^\circ\text{C}$  par rapport à la période préindustrielle pour les scénarios Euphorbe et Dahlia, et jusqu'à  $+1,5^\circ\text{C}$  pour Aster et Narcisse.

- En été, les projections divergent davantage. Les scénarios Aster, Dahlia et Euphorbe anticipent une diminution des précipitations estivales de l'ordre de  $-30\%$ ,  $-12\%$  et  $-5\%$  respectivement. Seul le scénario Narcisse projette une augmentation des précipitations estivales, estimée à  $+20\%$ . Tous les scénarios prévoient une hausse des températures maximales journalières estivales, comprise entre  $+1^\circ\text{C}$  pour Narcisse et  $+4,5^\circ\text{C}$  pour Dahlia (Figure 54). Les tendances concernant les températures minimales journalières suivent une évolution similaire, également présentée en Annexe 6.

Les quatre scénarios seront mobilisés dans les simulations.

#### *Données pédologiques et d'occupation du sol*

Les sols du bassin de la Souffel ont été décrits en détail dans le [chapitre 2, section 1.1](#). Les caractéristiques des différentes couches de sol proviennent soit de données fournies par la CRAGE, soit calculées à partir des fonctions de pédotransfert. L'ensemble des paramètres du module sol est présenté dans le Tableau 18.

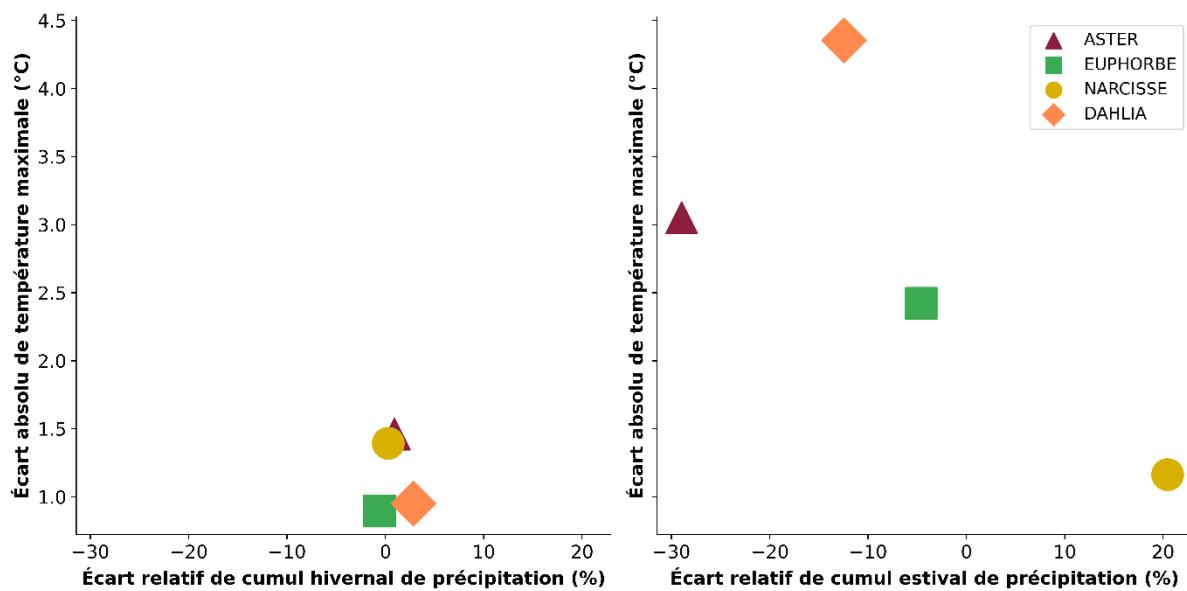


Figure 54. Caractéristiques des narratifs Explore 2 (scénarios RCP 8.5) en termes d'écart de précipitation et de température maximale sur la période 2065-2075 par rapport à la période 2015-2023 sur la maille centrale de la Souffel.

---

réchauffement et un assèchement prononcé en été, Euphorbe par un réchauffement marqué associé à une augmentation des précipitations, tandis que Narcisse présente des changements futurs relativement limités.

*Tableau 18. Paramètres du module sol requis dans MAELIA et SWAT+.*

Paramètre	Unité
Perméabilité	mm/j
Profondeur de la couche	mm
Densité apparente	g/cm <sup>3</sup>
Réserve utile	mm
Conductivité hydraulique	mm/h
Structure du sol	[0-1]
pH	-
C/N	-
Taux de calcaire	%
Taux de matière organique	%
Taux d'argile	%
Taux de cailloux	%
Humidité à la capacité au champs	% volumique
Humidité au point de flétrissement	% volumique

L'occupation du sol a été maintenue à l'identique par rapport à celle observée sur le territoire actuel, avec une répartition constante entre zones urbaines, zones naturelles et zones agricoles. Ainsi, quelle que soit l'image simulée, la part de surface agricole reste inchangée. La répartition de l'occupation du sol est rappelée en introduction du [chapitre 2](#).

### *Hydrologie*

Le débit moyen annuel de la Souffel, de 254 L/s (de 2019 à 2025), correspond à un débit spécifique de 2.21 L/s/km<sup>2</sup>, soit environ entre trois et cinq fois inférieur à celui des rivières voisines. En aval, le débit est fortement soutenu par les apports des stations d'épuration des eaux usées (STEP), y compris en période d'étiage. Depuis 2020, il ne subsiste que deux stations d'épuration : Griesheim et Truchtersheim. Cependant, 76 % du réseau hydrographique est situé à l'amont de ces rejets demeure exposé aux sécheresses estivales. Les habitants rapportent d'ailleurs des assecs complets certains été à l'amont du bassin.

Lors des étés peu pluvieux (2019, 2020, 2022 et 2023), le débit à l'exutoire est quasi exclusivement assuré par les STEP. En 2020, par exemple, près de 200 jours ont été marqués par une contribution supérieure à 50 % de ces rejets, avec parfois des valeurs dépassant 100 %, signe de pertes d'eau entre le point de rejet et la station de mesure. Ces faibles débits traduisent une capacité de dilution extrêmement limitée pour les polluants, avec un impact direct sur la qualité de l'eau.

### *Qualité de l'eau*

Des campagnes de surveillance mensuelles ont été conduites par l'AERM sur dix stations réparties le long des principaux cours d'eau du bassin versant de la Souffel. Elles révèlent une qualité de l'eau détériorée. En amont de Truchtersheim, 94 % des mesures de concentration en nitrates ont dépassé la limite réglementaire de potabilité fixée à 50 mg/L entre 2019 et 2022. La qualité de l'eau mesurée en aval des STEP s'avère souvent meilleure qu'en amont,

en raison de la conformité des rejets et de l'effet de dilution qu'apporte ce volume d'eau supplémentaire. Ainsi, au point de sortie, seules 11 % des valeurs annuelles dépassent 50 mg/L, tandis que 55 % excèdent le seuil environnemental de 28 mg/L. Pour compléter les données mensuelles de l'AERM, l'ITES a mené une campagne de mesures en continue entre mars et octobre 2019, grâce à un protocole d'échantillonnage automatique asservi au débit. En 2019, la concentration moyenne en nitrates à Mundolsheim (exutoire) était de  $22,3 \pm 9,7$  mg/L. Ce résultat confirme l'effet de dilution lié aux rejets traités par boues activées dans les trois stations d'épuration, en comparaison avec les tronçons en amont. Cependant, cet effet n'est pas observé pour les pesticides.

L'attention portée au S-métolachlore dans cette étude repose sur son usage intensif dans le bassin versant et sur les niveaux élevés de contamination relevés depuis plus de dix ans lors des suivis mensuels de l'AERM. Cet herbicide, principalement appliqué sur maïs et betterave, a été interdit fin 2023, mais reste pertinent comme molécule modèle pour caractériser les herbicides utilisés sur les cultures de printemps ([Droz et al., 2025](#)). Dans le bassin de la Souffel, il est appliqué deux fois par an sur les betteraves sucrières (seconde quinzaine d'avril) et une fois sur le maïs (seconde quinzaine de mai). Le suivi de l'AERM a montré que le S-métolachlore et ses métabolites (ESA, OXA, NOA) se retrouvent fréquemment à des concentrations élevées dans les eaux de surface et souterraines ([Payraudeau & Imfeld, 2021](#)).

A la station de sortie, 39 % des mesures dépassent le seuil de potabilité de 0,01 µg/L. Contrairement aux nitrates, la contribution des stations d'épurations au flux de S-métolachlore est plus significatif et a été évalué lors de la campagne de 2019 à  $53 \pm 24$  % du flux mesuré à l'exutoire de mars à octobre. Après discussion avec les animateurs du SDEA et de la Chambre d'agriculture du Bas-Rhin, la cause la plus probable de ces rejets de cet herbicide par les stations d'épuration serait à la préparation des pesticides ou du nettoyage des pulvérisateurs dans les cours de fermes situées dans les cœurs de village en contexte alsacien.

#### *Données agronomiques pour la période actuelle*

Les données issues du Registre Parcellaire Graphique (RPG) ont été regroupées de manière à identifier les cultures majoritairement cultivées sur le territoire et les principales rotations culturales. À partir de ces regroupements et d'enquêtes antérieures menées localement dans le Kochersberg ([ARAA, 2017](#) ; [Legrand, 2020](#)), nous avons pu reconstituer les itinéraires techniques correspondant aux trois cultures largement dominantes en 2021 : le maïs grain, le blé d'hiver et la betterave, qui représentent ensemble 72 % de la surface agricole du territoire (Figure 1).

Pour réduire la phase de création et paramétrisation des cultures en vue de leur intégration dans les modèles, les autres cultures, appartenant en majorité aux mêmes familles que ces trois cultures principales, ont été assimilées à celles-ci sur la base de leur proximité agronomique. Par exemple, les cultures de blé dur, blé tendre et orge d'hiver ont été regroupées sous la catégorie "blé".

Les zones herbacées représentent environ 7 % du territoire, incluant à la fois les bordures déclarées proches de la ripisylve et les prairies utilisées pour le pâturage et/ou la production de foin. Lors de l'implémentation des quatre images, MAELIA ne permettait pas encore de

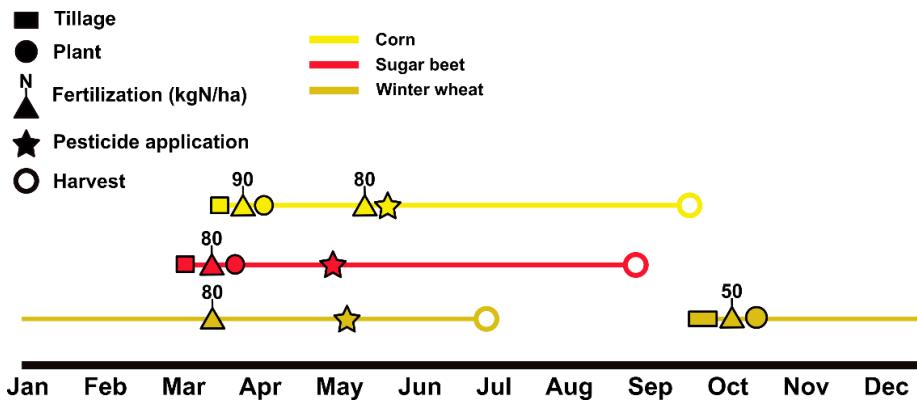


Figure 55. Itinéraires techniques des trois principales cultures présentes sur le territoire, utilisés pour l'implémentation des données d'entrées des modèles SWAT+ et MAELIA.

produire de résultats quantitatifs pour ces surfaces, ce qui explique l'absence de rendements associés à cette culture. D'autres cultures sont également présentes sur le territoire, telles que le maraîchage, l'arboriculture et la viticulture. En raison de la grande variabilité de leurs itinéraires techniques, elles n'ont pas été intégrées aux simulations. Ensemble, elles représentent 5,5 % de la Surface Agricole Utile (SAU). Les résultats obtenus constituent une simplification de la réalité territoriale. Toutefois, ils restent suffisamment représentatifs des pratiques agricoles dominantes sur le territoire de la Souffel, couvrant plus de 75 % de la SAU.

#### *Données agronomiques pour les images co-construites à l'horizon 2070*

#### Agriculture de firme

Le système cultural associé à l'image **Agriculture de firme**, représenté sur la Figure 56, repose sur une structure simplifiée, majoritairement orientée vers les grandes cultures (maïs, blé, tournesol) avec une rotation de quatre ans. Il intègre deux types de couverts intermédiaires : une culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE) et une culture intermédiaire piège à nitrates à vocation agroenvironnementale (CIPAN), ce dernier étant laissé sur place en tant qu'engrais vert. La Figure 56 détaille également les calendriers d'intervention, incluant le travail du sol, la période de semis, les périodes de fertilisation azotée et les doses appliquées dans ce cas, sous forme d'engrais de synthèse (urée et ammonitratre), ainsi que les dates d'application d'herbicides, propres à chaque culture. Les cultures de maïs et de blé se distinguent par un nombre d'interventions supérieur à celui du tournesol.

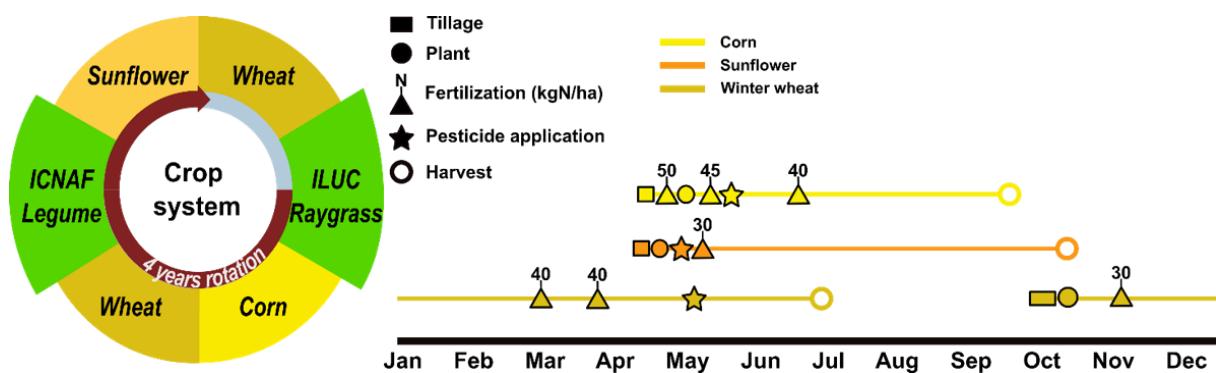


Figure 56. Système de culture et itinéraires techniques des cultures principales implémentées pour simuler l'image Agriculture de firme (ICNAF : CIPAN, ILUC : CIVE).

Dans ce système, les légumineuses sont partiellement valorisées sous forme de résidus organiques restitués au sol, ce qui permet de réduire légèrement les besoins en fertilisation azotée, notamment pour le tournesol, précédé par un engrais vert. Les itinéraires techniques mis en œuvre s'inscrivent dans une logique d'agriculture conventionnelle, avec quelques ajustements notables. Le nombre d'applications d'herbicide est fortement réduit par rapport aux pratiques actuelles, grâce à un système de culture reposant sur une rotation plus diversifiée des cultures.

La fertilisation est également systématiquement fractionnée, c'est-à-dire que la dose totale d'azote est subdivisée en plusieurs apports effectués à des étapes de croissance qui coïncident avec les besoins de la culture pour que l'azote soit utilisé le plus efficacement possible. Cette stratégie vise à limiter les excès du reliquat azoté susceptibles de favoriser la lixiviation de nitrates depuis la zone racinaire.

### Agriculture duale de modèles spatialisés

Dans l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés**, les grandes exploitations présentent un système de culture globalement similaire à celui de l'image **Agriculture de firme**. Les exploitations de plus petite taille, quant à elles, se distinguent par des cultures maraîchères, qui seront décrites ultérieurement. Cette image se caractérise par une légère complexification des systèmes de culture, avec des rotations sur six ans plus diversifiées intégrant un plus grand nombre d'espèces, bien que toujours centrées sur des grandes cultures, même si l'hétérogénéité reste limitée () .

Les pratiques restent globalement conventionnelles, avec un usage régulier d'engrais de synthèse (urée, ammonitrat) et d'herbicide. Toutefois, les quantités appliquées sont plus modérées que dans l'image précédente, et les apports azotés font systématiquement l'objet d'un fractionnement, limitant ainsi les risques de lixiviation. Une nouveauté notable dans ce système est l'introduction du soja, culture fixatrice d'azote qui ne requiert pas de fertilisation azotée, contribuant à la réduction des intrants. De plus, des légumineuses sont également implantées en tant qu'engrais verts, permettant de limiter les besoins en azote minéral pour les cultures suivantes, en particulier le maïs et le tournesol.

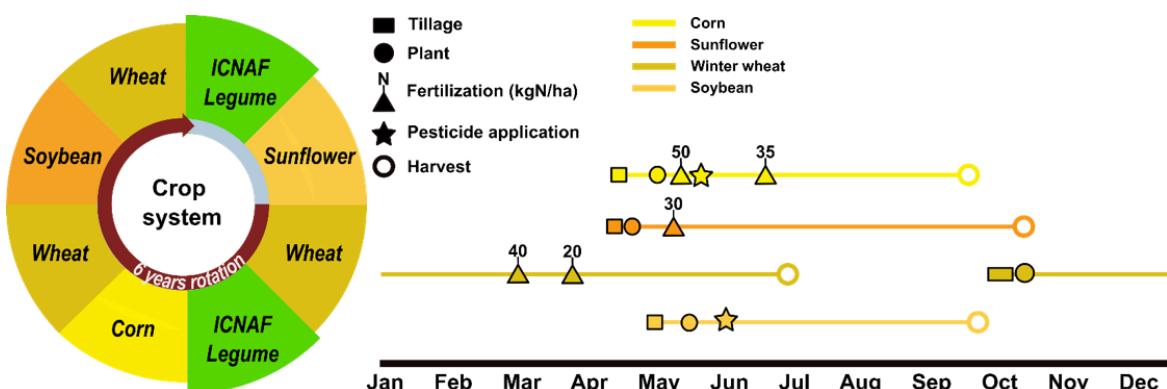


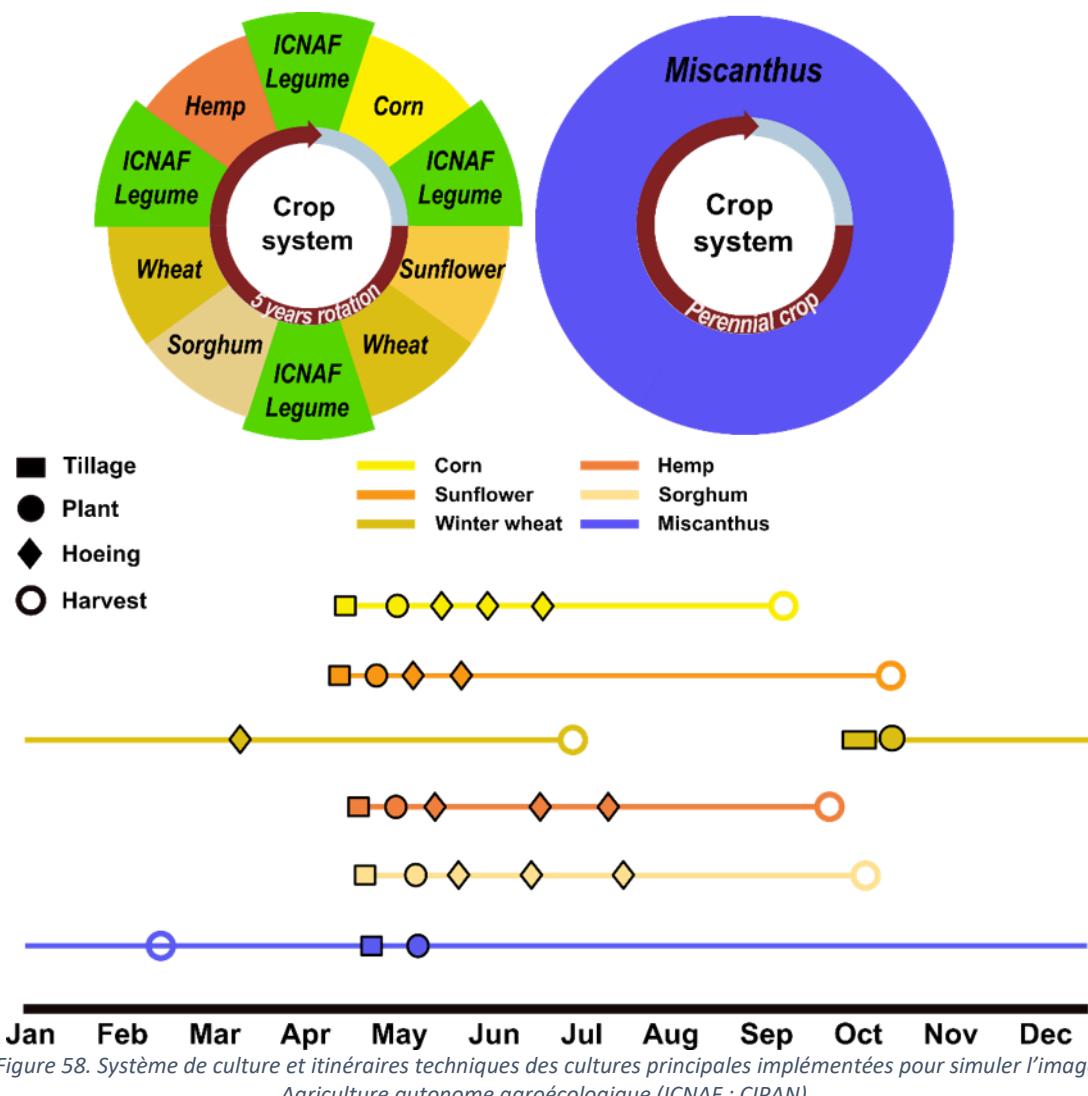
Figure 57. Système de culture et itinéraires techniques des cultures principales implémentées pour simuler l'image Agriculture duale de modèles spatialisés (ICNAF : CIPAN).

## Agriculture autonome agroécologique

L'image **Agriculture autonome agroécologique** propose un système de cultures profondément remanié, caractérisé par une diversification accrue des cultures et une structuration systématique en double alternance entre cultures principales d'été et d'hiver, associées à des couverts intermédiaires (Figure 58). Ce système de cultures, basé sur une rotation sur cinq années, garantit une couverture permanente des sols, réduisant ainsi les risques d'érosion et de pertes de nitrates par lixiviation.

L'introduction d'une large hétérogénéité des cultures, couplée à la présence de productions maraîchères (décrivées ultérieurement), permet d'assurer un niveau d'utilisation des sols élevé. Le système inclut également des espèces rustiques telles que le chanvre et le sorgho, choisies pour leur tolérance accrue aux parasites et aux maladies. La culture pérenne de miscanthus, exploitée pour la production de biomasse, est également intégrée : elle ne nécessite ni intrants ni interventions régulières, à l'exception de l'année d'implantation.

Une spécificité majeure de ce système de cultures réside dans la forte présence de cultures intermédiaires à base de légumineuses, utilisées partiellement comme engrains verts (environ



50 % de la production de légumineuses). Cette stratégie permet de tester la pertinence des systèmes qui visent à couvrir intégralement les besoins azotés des cultures principales sans recours à des fertilisants minéraux ou organiques externes. Cela se traduit, dans les itinéraires techniques (Figure 58), par l'absence d'application de fertilisants.

Par ailleurs, trois autres caractéristiques marquent ce système :

- Aucune utilisation d'herbicides, remplacés par des interventions mécaniques de désherbage (binage) tout au long du cycle cultural.
- Travail du sol limité à un labour superficiel, restreint aux trois premiers centimètres, afin de préserver la structure pédologique et de limiter les risques d'érosion.
- Occupation continue des sols et diversification des rotations, renforçant la résilience agroécologique et l'efficience des cycles biogéochimiques.

### Agriculture biologique et technologique

L'image **Agriculture biologique et technologique** reprend le système de cultures développé dans l'image **Agriculture autonome agroécologique**, tout en y associant un élevage bovin et un système prairial. Cette association modifie la gestion des fertilisants, les cultures principales étant en partie fertilisées à partir de fumier bovin, la majeure partie de l'azote étant toujours apportée par les CIPAN utilisés partiellement comme déchets verts. Comme le

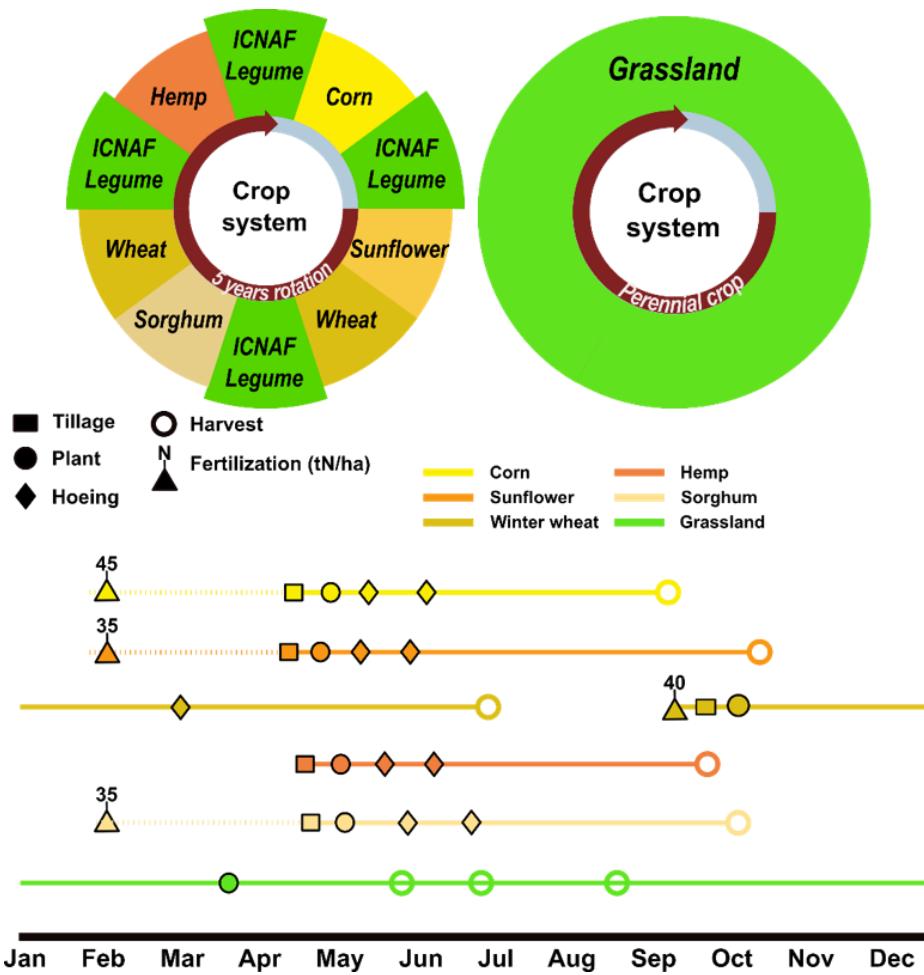


Figure 59. Système de culture et itinéraires techniques des cultures principales implémentées pour simuler l'image Agriculture biologique et technologique (ICNAF : CIPAN).

montre la Figure 59, l'épandage est réalisé en amont afin de permettre au fumier de se décomposer progressivement dans le sol. La fertilisation est complétée par une part de légumineuses cultivées en interculture, laissées au sol et valorisées en tant qu'engrais verts (environ 35 % des cultures de légumineuse). Ce double apport permet de couvrir les besoins azotés des cultures sans recours à des engrais de synthèse. La présence d'élevage entraîne une reconfiguration de l'occupation du sol : une part significative des surfaces agricoles est dédiée aux prairies permanentes pour l'alimentation animale. En tant que cultures pérennes, elles sont exploitées à raison de trois fauches annuelles.

Comme dans l'image précédente, cette image se caractérise par l'absence totale d'herbicides. Le contrôle des adventices est assuré exclusivement par des moyens mécaniques, en particulier le binage, effectué de manière régulière tout au long du cycle végétatif. Enfin, cette image inclut également des productions maraîchères, décrite dans la prochaine section.

### Maraîchage

En termes de modélisation, la représentation du maraîchage a été simplifiée. En effet, lors de la mise en œuvre du modèle MAELIA dans ce travail de thèse, seule la pomme de terre pouvait être simulée de manière opérationnelle. Cette culture a donc été utilisée comme espèce proxy pour l'ensemble du système maraîcher, ce qui constitue une limite mais permet néanmoins une première approximation de la culture maraîchère.

Cette section est traitée indépendamment car la culture maraîchère est commune à trois images **Agriculture duale de modèles spatialisés**, **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique et technologique**. De plus, les résultats liés au maraîchage sont également présentés à part, notamment en raison des rendements de la pomme de terre, nettement supérieurs à ceux des autres cultures, ce qui limitait la lisibilité des figures.

Deux systèmes de culture ont été testés pour le maraîchage. Le premier système de culture, associé à l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés** repose sur une alternance pluriannuelle, illustrée dans la Figure 60, en haut : deux années de luzerne précèdent quatre années consécutives de cultures maraîchères de plein champ pour l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés**. Cette structure s'inspire des principes de l'agriculture biologique, en intégrant une phase de légumineuse pérenne dans la rotation. Étant donné que la luzerne est une culture semi-pérenne, les opérations de travail du sol et de semis ne sont requises que lors de la première année de mise en culture. En revanche, l'opération de destruction de la luzerne, réalisée sans recours aux herbicides, n'est nécessaire qu'à partir de la seconde année.

La luzerne joue un rôle de fixatrice d'azote et enrichit le sol en éléments nutritifs disponibles pour les cultures suivantes, ce qui permet de se passer de fertilisation azotée tout en maintenant un bon niveau de fertilité. Aucun herbicide n'est appliqué dans ce système. La gestion des adventices repose exclusivement sur le travail mécanique du sol, en particulier le binage, intégré à l'itinéraire technique de chaque culture. Le second système de culture, commun aux deux images **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique et technologique**, repose sur une alternance annuelle entre un couvert intermédiaire de pois d'hiver et de la pomme de terre (Figure 60, en bas). Cette alternance, rendue possible par un semis précoce, peut avoir un effet bénéfique sur la fertilisation de la pomme de terre.

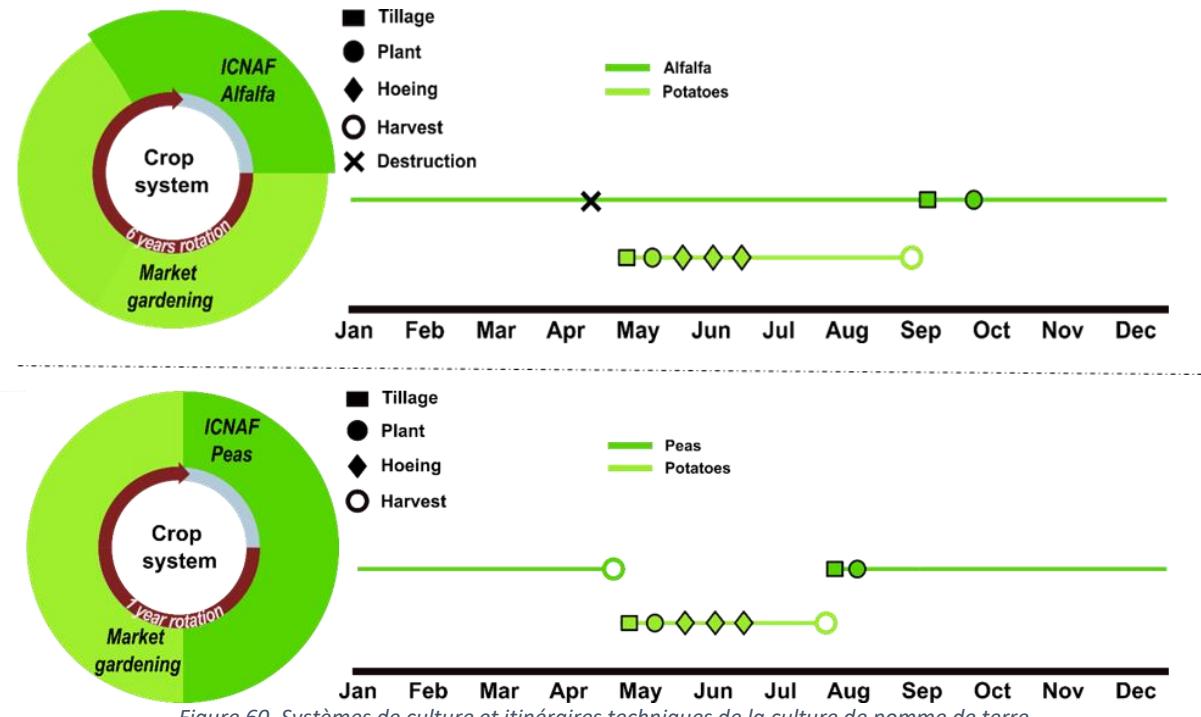


Figure 60. Systèmes de culture et itinéraires techniques de la culture de pomme de terre

## 1.2 Calibration des modèles agro-hydrologiques

Les résultats obtenus avec MAELIA ont été comparés aux rendements observés par la chambre d'agriculture sur la période 2016-2023, tandis que ceux issus de SWAT+ ont été comparés aux concentrations de nitrate mesurées à l'exutoire entre 2019 et 2023 par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse. Les deux modèles nécessitent une période de « chauffe », c'est-à-dire le temps requis pour que les simulations deviennent indépendantes des conditions initiales : quatre ans pour le module hydrologique de SWAT+ et deux ans pour le module agronomique de MAELIA. Dans les deux cas, MAELIA comme SWAT+ sont des modèles dits « à réservoirs », où les conditions initiales reflètent un certain niveau de remplissage de ces réservoirs. Les différents forages liés aux données d'entrée (climat, hydrologie, sol, occupation du sol, etc.) font progressivement évoluer cet état initial vers celui correspondant à la simulation proprement dite.

### MAELIA

MAELIA est calibré par rapport aux rendements observés sur la période 2016-2023, en appliquant le modèle sur une vingtaine d'exploitation représentatives de la diversité locale, afin de travailler sur des temps de simulations courts. Cette simplification permet de gagner du temps de calcul dans cette phase du travail, effectuée par essais-erreurs via des cycles itératifs.

Lors de la phase exploratoire de prise en main, deux paramètres ont été identifiées comme nécessitant un ajustement : la réserve utile des sols, le rapport C/N. Les valeurs de réserve utile et de rapport C/N des huit sols du bassin de la Souffel ont ainsi été modifiées dans un intervalle raisonnable autour des références fournies pour chaque paramètre et type de sol dans le but d'obtenir des valeurs de rendement cohérentes. Les règles de décision associées aux itinéraires techniques ont également été adaptées au contexte local. Chaque itinéraire

comprend divers travaux agricoles qui doivent être planifiés à des intervalles particuliers, conditionnés par des facteurs extérieurs (précipitations, humidité du sol, températures journalières minimale et maximale, etc.). Pour certaines cultures majeures comme le maïs, le blé ou le tournesol, les correspondances entre fertilisation et stades végétatifs ont été adaptées en plus des règles de conditionnalité ([Tribouillois et al., 2020](#)). En l'absence de données précises sur les pratiques locales, ces paramètres ont été fixés manuellement, en respectant l'ordre des opérations et en s'appuyant sur des informations collectées lors des entretiens préliminaires menés auprès des animateurs de la Chambre d'Agriculture et des agriculteurs ayant participé aux ateliers.

Certaines cultures intermédiaires (ray-grass italien) ou principales (chanvre, miscanthus, luzerne) ne sont pas directement intégrées dans MAELIA. Leurs stades de croissance ont été paramétrés à partir de cultures proches, avec ajustement des paramètres critiques définissant le développement comme la somme des degrés-jours ou les températures minimales requises pour des stades de développement particuliers après discussion avec l'équipe de développement de MAELIA.

## SWAT+

La modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant de 115 km<sup>2</sup> a été réalisée à l'aide du modèle SWAT+, avec une calibration effectuée sur la période 2019–2022. Cette période de quatre ans, relativement courte, est liée à la mise en route récente de la station hydrométrique sur ce cours d'eau en mars 2019. Toutefois elle permet une bonne représentativité de la variabilité climatique interannuelle : elle inclut ainsi l'année 2021, particulièrement pluvieuse (la plus pluvieuse des 15 dernières années avec 830 mm), ainsi que l'année 2022, marquée par une faible pluviométrie (591 mm annuelle dont 88 mm sur la période juillet-août) et des températures élevées (température moyenne maximale entre juillet et août de 30 °C contre 26°C en moyenne sur les 10 années précédentes). Cette variabilité permet au modèle d'intégrer une diversité de conditions hydroclimatiques dans sa phase de calibration. L'année 2023 a quant à elle été réservée à la validation du modèle (Figure 65).

La calibration du modèle a été conduite dans le cadre de la simulation du territoire en l'état actuel, c'est-à-dire avec l'occupation du sol observé entre 2019 et 2022. Elle s'est concentrée sur les 5 paramètres jugés les plus influents parmi les 186 que propose SWAT+, en lien avec les processus de stockage de l'eau, les débits, la croissance des cultures, ainsi que le transport des nutriments et des pesticides ([Abbas et al., 2024](#) ; [Tolson & Shoemaker, 2007](#)). La sélection de ces paramètres a été réalisée à l'aide d'une analyse de sensibilité via la méthode Sobol ([Saltelli et al., 2008](#)) souvent utilisée pour cette étape clé de la modélisation pour les modèles de transport réactif ([Gatel et al., 2020](#)). Cette méthode est disponible dans SWAT Toolbox ce qui facilite cette étape. La méthode Sobol calcule la contribution de la variance de chaque paramètre à la variance globale d'une variable de sortie. La calibration de ces 5 paramètres a été réalisée via une phase de calibration manuelle qui a permis de mieux comprendre le fonctionnement interne du modèle et les effets des différents paramètres sur la dynamique hydrologique simulée (Annexe 7 & Annexe 8). Il est à noter que pour réduire les temps de calculs, le nombre de HRU a été optimisé en associant à chaque HRU l'occupation du sol

majoritaire ce qui a eu pour effet de faire disparaître la betterave à sucre de la représentation dans l'occupation du sol dans SWAT+.

Les ajustements relatifs, exprimés en pourcentage des valeurs initiales, sur ces 5 paramètres (cf. Annexe 8) ont été appliqués de manière homogène à l'ensemble des Unités Hydrologiques de Référence (HRU), sans différenciation spatiale par secteur. À l'issue de cette calibration, l'indice NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) atteint une valeur médiocre de 0,24 pour les débits journaliers, impacté par la difficulté à reproduire certains pics de crues. Ce critère monte à 0.66, jugé satisfaisant (*Moriasi et al., 2007*), lorsqu'il est calculé sur les valeurs logarithmiques des débits journaliers et est de 0.97 sur les débits moyens hebdomadaires traduisant sa capacité à reproduire les tendances intra-saisonnières à défaut de la dynamique journalière (Annexe 8). Globalement, le bilan hydrologique est donc bien représenté, et la dynamique générale des débits est correctement simulée. La valeur relativement faible du NSE sur les débits journaliers s'explique en grande partie par la forte sensibilité de cet indicateur aux pics de débit, du fait de la pondération quadratique des écarts. De plus, certaines données observées semblent entachées d'erreurs ponctuelles : par exemple, en janvier 2020, la dynamique observée est incohérente, possiblement en raison d'un dysfonctionnement du capteur ou d'un obstacle temporaire perturbant la mesure. Ce type d'incertitude est courant sur des cours d'eau à faible débit, comme la Souffel.

## 2. Présentation des résultats

Cette section présente les résultats de modélisation pour la période actuelle ainsi que pour les quatre images co-construites lors du second atelier. Les trajectoires agricoles sont simulées sur le long terme, entre 2065 et 2075, en utilisant les quatre scénarios climatiques comme forçage. Le territoire étudié présente des contraintes importantes : seule une petite portion se situe au-dessus de la nappe phréatique d'Alsace (cf. [chapitre 2](#)), ce qui rend difficile un développement généralisé de l'irrigation. Ainsi, dans les simulations, seules les cultures de pomme de terre ont été paramétrées pour l'irrigation. Or, ces cultures représentent une part non négligeable de la SAU dans les images **Agriculture duale de modèles spatialisés**, **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique et technologique**, ce qui suppose des besoins en eau conséquents pour ces images. Le territoire étant encore actuellement non irrigué pour les grandes cultures, l'irrigation n'a pas non plus été utilisée pour les simulations sur la période actuelle.

Dans un premier temps, les résultats obtenus pour la période actuelle sont présentés afin de valider le bon fonctionnement des modèles. La deuxième partie présente les simulations futures, en particulier les rendements agricoles et la lixiviation azotée à l'horizon 2070, pour chacune des images et sous chacun des scénarios climatiques testés. Enfin, la dernière partie s'intéresse aux résultats relatifs au stress azoté et hydrique, afin d'identifier les situations où les mécanismes de croissance des cultures sont limités dans les modèles sous forçage climatiques.

### 2.1 Période actuelle

#### *Rendement*

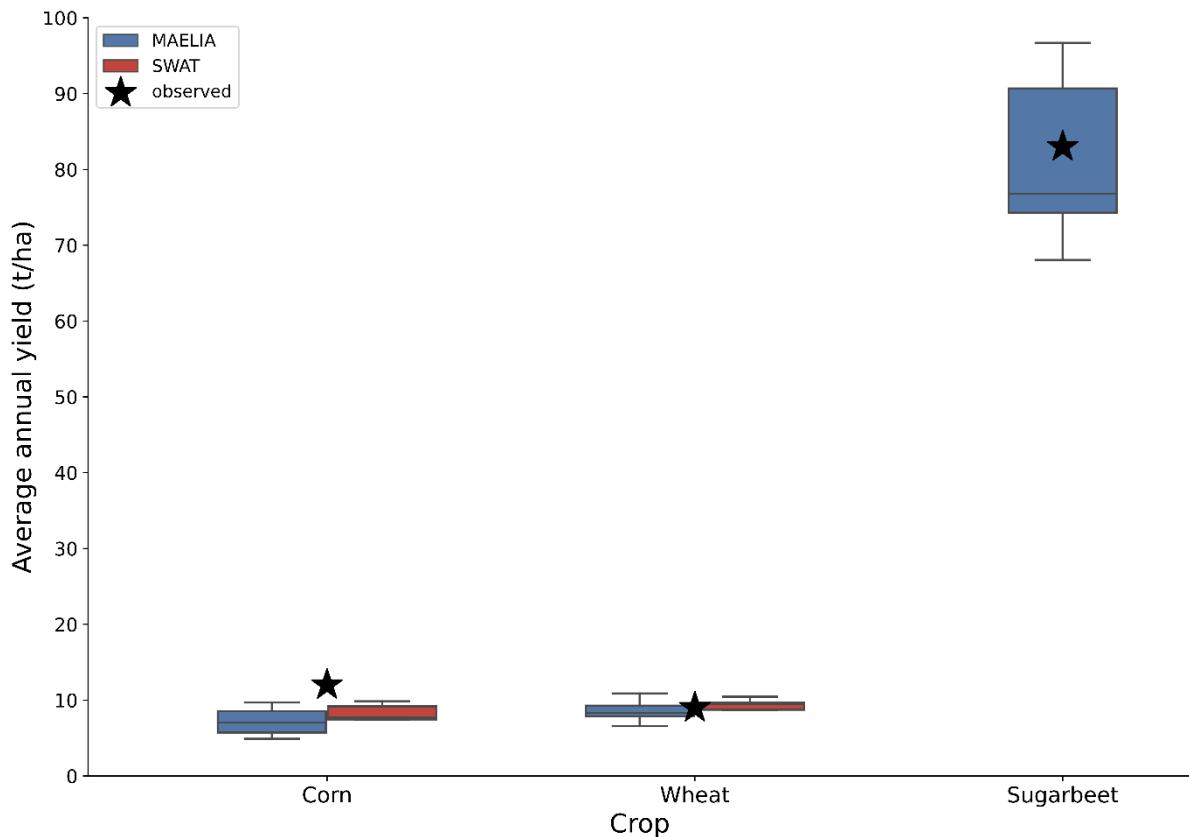


Figure 61. Diagramme en boîte des résultats de simulation des modèles MAELIA (en bleu) et SWAT+ (en rouge) issu des simulations sur les différentes cultures sur la période 2016-2023 (Aucune HRU ne présente la betterave à sucre comme culture majoritaire, expliquant l'absence de rendement pour cette culture dans SWAT+)

Les résultats obtenus ont été comparés aux rendements observés sur le territoire, permettant ainsi une validation a posteriori des simulations. La Figure 61 présente les rendements de maïs, de blé et de betterave simulés par les modèles MAELIA et SWAT+ sur la période 2015–2023. Elle inclut également la moyenne des rendements observés sur le territoire, calculée à partir des données fournies par la chambre d'agriculture pour la même période.

On observe que les rendements simulés par MAELIA sont légèrement inférieurs à ceux produits par SWAT+ : pour le maïs, la moyenne est de 9,1 t/ha avec MAELIA contre 9,4 t/ha avec SWAT+ ; pour le blé, 9,6 t/ha contre 9,8 t/ha respectivement. Les résultats de MAELIA présentent également une plus grande variabilité, comme l'indique l'élargissement du boxplot, comparé à celui de SWAT+.

Cette variabilité reflète en partie les fortes fluctuations de production observées au cours de la période, notamment en 2016, année marquée par une baisse importante des rendements en blé tendre (environ –30 %) à la suite d'un épisode de pluies intenses fin mai /début juin. Cet événement avait favorisé le développement de maladies fongiques, en particulier la fusariose et des regains de septoriose ([Nóia-Júnior et al., 2025](#)). Bien que les modèles n'intègrent pas explicitement les maladies, MAELIA a tout de même simulé une baisse de rendement en 2016, en lien avec une diminution du rayonnement incident, traduite par une réduction de la photosynthèse, phénomène que SWAT+ semble moins bien reproduire.

Enfin, la Figure 61 montre que les deux modèles sous-estiment légèrement les rendements du maïs, d'environ une tonne par hectare, par rapport aux données observées sur la période

2016–2023. En revanche, les rendements simulés pour le blé et la betterave s'avèrent proches des valeurs mesurées. Ces résultats permettent de considérer avec un certain degré de confiance la capacité des modèles à représenter de manière satisfaisante les rendements à partir d'itinéraires techniques spécifiques.

#### *Transport réactif des nitrates et des pesticides*

Trois aspects sont simulés ici pour servir d'indicateur à l'évaluation de la pollution : la lixiviation des nitrates sous la zone racinaire (Figure 62), les flux en nitrates dans la rivière (Figure 63), ainsi que les flux en pesticides dans la rivière en utilisant l'herbicide S-métolachlore, appliqué sur le maïs et la betterave à sucre comme composé modèle (Figure 64).

La Figure 62 présente la moyenne annuelle de lixiviation sous la zone racinaire pour les trois cultures majoritaires du territoire (MAELIA). Ces valeurs simulées sont cohérentes avec les ordres de grandeurs mesurées sur le territoire, à la fois dans le sol et dans les cours d'eau. On constate que les niveaux de lixiviation sont plus élevés pour le maïs et la betterave, cultures pour lesquelles les apports d'intrants sont généralement plus fréquents et plus importants que pour le blé. Les variations interannuelles apparaissent également en adéquation avec les conditions climatiques : les périodes de faibles lixiviations correspondent à des saisons sèches, durant lesquelles les reliquats azotés tendent à s'accumuler dans les sols. À l'inverse, les périodes de fortes précipitations favorisent leur transfert vers les rivières, augmentant ainsi le risque de pollution diffuse. Sur le territoire étudié, les années 2017 à 2020 se distinguent

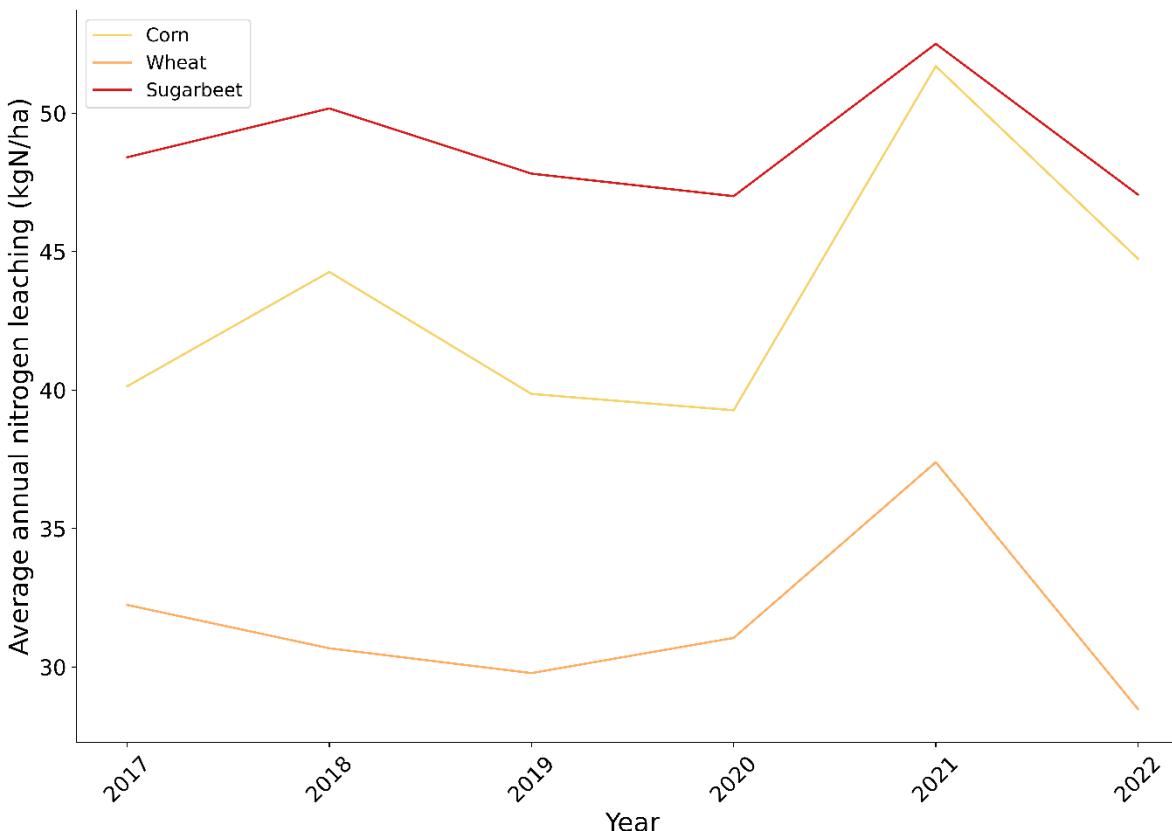


Figure 62. Lixiviation d'azote sous la zone racinaire moyen annuel par culture en fonction des années modélisées par MAELIA.

par des conditions globalement sèches, tandis que l'année 2021 se caractérise par un climat particulièrement humide, notamment au printemps et à l'automne, ce qui se traduit par une hausse notable de la lixiviation qui est observée dans les simulations.

Des résultats similaires sont observés concernant la charge en nitrates dans la rivière Souffel, en cohérence avec les niveaux de lixiviation mesurés sous la zone racinaire. La Figure 63 présente la comparaison entre les données simulées par le modèle SWAT+ (en orange) et les données mesurées mensuellement par l'AERM à la station de Mundolsheim (en bleu). Le modèle parvient à reproduire de manière satisfaisante les tendances globales, comme le montre la correspondance entre les données simulées et les observations.

On observe également la présence des pics marqués de concentration en nitrates, correspondant à des épisodes de fortes précipitations survenant principalement après les applications d'engrais. Des pics plus modérés apparaissent aussi lorsque des pluies entraînent le lessivage des reliquats post-culturaux. Cette dynamique saisonnière est nette : les principales applications d'engrais entre mars et mai, pour les cultures de printemps, génèrent une charge importante en nitrates, tandis que les apports pour les cultures d'hiver produisent des hausses plus mesurées. Cela peut potentiellement s'expliquer par un cumul de précipitations plus faible à l'automne après les apports, par une quantité d'azote appliquée plus basse qu'au printemps, ou encore par le fait que la SAU concernée par la fertilisation automnale soit plus réduite. À l'inverse, les apports printaniers sont systématiques et massifs. Le modèle réagit ainsi de manière cohérente aux calendriers de fertilisation et aux conditions hydrométéorologiques. Ces fluctuations traduisent bien la dynamique de transport des nutriments vers la rivière, suggérant que SWAT+ restitue correctement les charges en nitrates à l'exutoire du bassin de la Souffel.

La Figure 64 présente la courbe des masses cumulées observées et simulées à l'exutoire du bassin versant entre 0.4 et 0.5 g/ha, permettant ainsi d'évaluer les performances du modèle. Il est à noter que pour obtenir ce résultat, une initialisation en 2015 des concentrations en S-

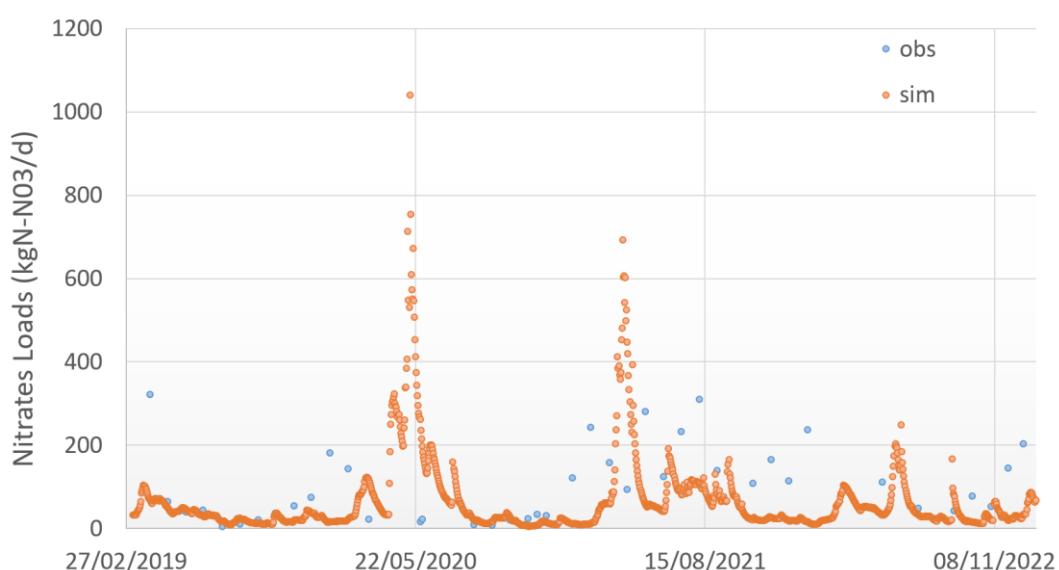


Figure 63. Charge de nitrates simulée par SWAT+ (en orange) et observée au pas de temps menseul (AERM, en bleue) entre 2019 et 2023 dans la Souffel à Mundolsheim, France (Picot, 2024).

métolachlore dans les différents compartiments environnementaux de SWAT+ a été réalisée en s'appuyant sur celles simulées fin 2025. Ceci permet de mieux intégrer le fait que le S-métolachlore est appliqué depuis les années 2005.

L'herbicide est appliqué en avril sur les parcelles de betterave, et en deux passages successifs fin mai sur les parcelles de maïs (zone grisée sur la figure). Dans les données observées, la courbe cumulative (en orange) reflète une montée progressive des concentrations, liée à la variabilité des dates d'application entre exploitations. En effet, les agriculteurs n'interviennent pas tous au même moment, ce qui entraîne une diffusion temporelle du signal de contamination. Le premier pic observé lié aux applications sur la betterave n'est pas simulé par SWAT+ car les 10% de betteraves sur le bassin versant en 2019 ne sont pas retenu comme culture principale dans les HRU en raison du mode d'agrégation retenu. Les pics les plus marqués coïncident avec des événements pluviométriques intenses qui succèdent aux applications sur le maïs. Dans les simulations, ces pics apparaissent plus abrupts et légèrement décalés par rapport aux observations. Cette différence s'explique par le mode de gestion des opérations agricoles dans SWAT+, où les traitements sont supposés appliqués de manière uniforme sur toutes les parcelles le même jour (illustré par la flèche noire), ce qui amplifie artificiellement les pics simulés.

Malgré ces divergences ponctuelles, le modèle parvient à reproduire fidèlement le bilan global de contamination : les deux courbes cumulées atteignent un plateau final comparable, avec 0,42 g/ha pour les observations et 0,45 g/ha pour les simulations. Cela indique que le devenir global du S-métolachlore est correctement représenté. Cette première simulation constitue une base solide pour l'analyse critique des performances du modèle. Elle met en lumière certaines limites, comme l'implémentation d'une diversité de pratiques agricoles, mais montre également que, grâce à une calibration adéquate, le modèle est désormais en mesure de produire des résultats robustes, utilisables pour les analyses à venir.

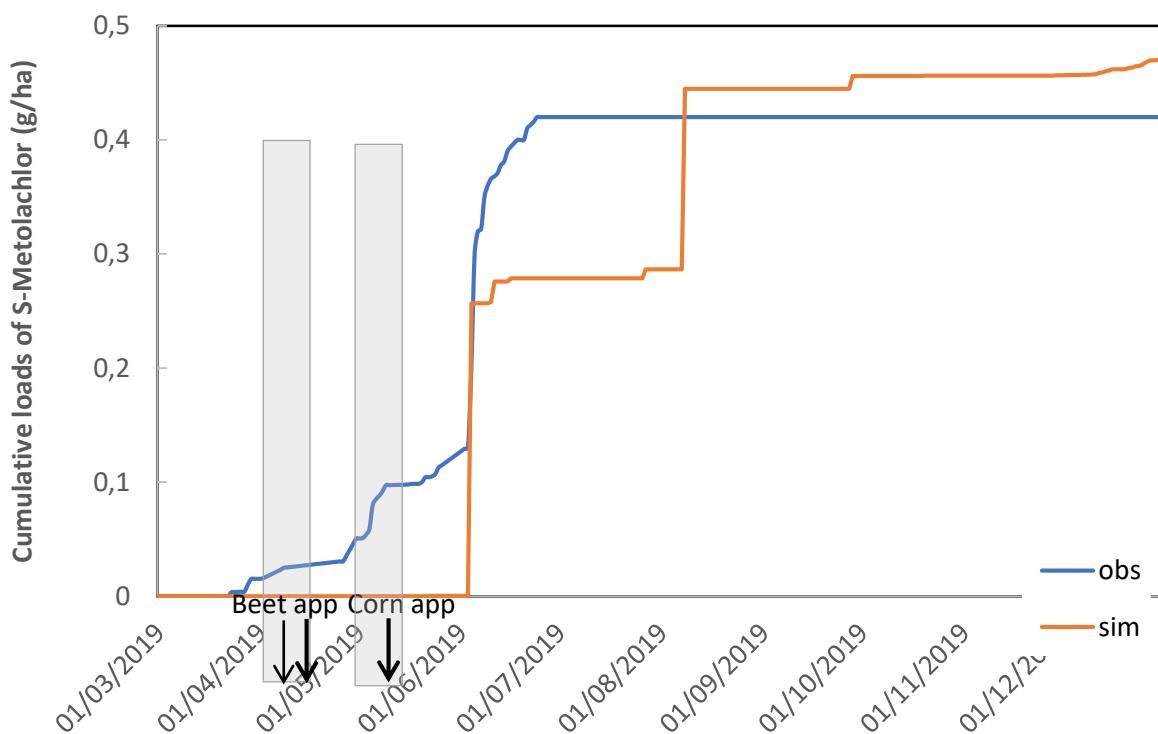


Figure 64. Charge simulée par SWAT+ (en bleu) et observée (campagne ITES, en orange) de S-metolachlor et période d'application pour les cultures de betterave et de maïs et en 2019 dans la Souffel à Mundolsheim, France, (Picot, 2024).

Tableau 19. Indicateurs évaluant la robustesse de la simulation après validation (2023), (Picot, 2024).

Indicators	Daily
NSE	0.58
LogNSE	0.65
PBIAS	-7.85
R <sup>2</sup>	0.81

## Hydrologie

Bien que le NSE soit l'indicateur de référence en modélisation hydrologique, d'autres métriques ont été mobilisées afin de compléter l'évaluation des performances du modèle. Le logNSE, plus sensible aux faibles débits, permet de mieux apprécier la qualité de la simulation en période d'étiage. Le PBIAS informe sur la tendance systématique du modèle à surestimer ou sous-estimer les flux. Enfin, le coefficient de détermination R<sup>2</sup> mesure la corrélation entre les données simulées et observées. Pour affiner l'analyse de l'ajustement global du modèle, ces indicateurs ont également été calculés à un pas de temps hebdomadaire, comme présenté dans le Tableau 19.

Pour la phase de validation, les indicateurs calculés au pas de temps journalier (Tableau 19) ont été jugés suffisants pour confirmer la cohérence entre les valeurs simulées et les observations. La capacité du modèle à reproduire les flux hydriques sortants du bassin versant est donc considérée comme satisfaisante. De plus les tendances entre les données observées et simulées semblent correctement représentées, comme on peut le voir sur la Figure 65.

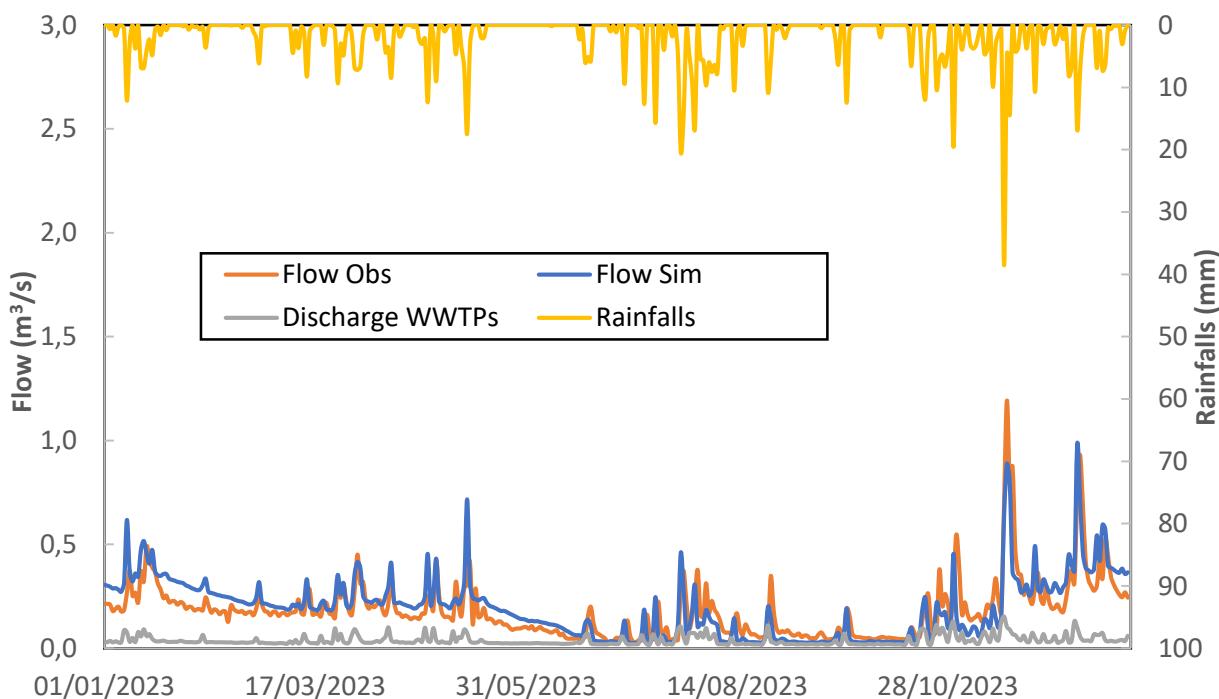


Figure 65. Hydrogramme représentant les différents flux (débits simulés et observés, rejet de STEP et précipitation) après le processus de validation de SWAT+ sur l'année 2023, (Picot, 2024).

## 2.2 Les simulations des quatre images de la Souffel (2065-2075)

Chacune des quatre sous-parties suivantes est consacrée à l'analyse des résultats d'une image projetée à l'horizon 2065–2075. La structure est identique pour chacune avec d'abord une présentation des résultats sur les rendements simulés par MAELIA, suivis de ceux concernant le transport des intrants : avec la lixiviation de l'azote avec MAELIA et la charge en azote dans la rivière à l'exutoire avec SWAT+ transport d'herbicide à l'exutoire du bassin versant avec SWAT+ pour les images qui en utilisent en 2070.

### *Image 1 : Agriculture de firme*

#### *Rendements*

Les résultats présentés dans la Figure 66 révèlent des variations importantes des rendements agricoles à l'horizon 2065–2075 par rapport à ceux observés actuellement. On constate une diminution moyenne d'environ 25 % pour le maïs et de 34 % pour le blé, en comparaison avec les rendements simulés sur la période de référence 2016-2023.

Ces résultats sont issus de projections qui reposent sur des systèmes de culture proches de l'agriculture conventionnelle actuelle, intégrant toutefois des pratiques d'épandage plus strictement encadrées. Ces ajustements, a priori peu pénalisants en termes de productivité, ne suffisent pas à expliquer de telles baisses, ce qui met en évidence l'influence déterminante du changement climatique sur les rendements. L'effet du forçage climatique, et en particulier

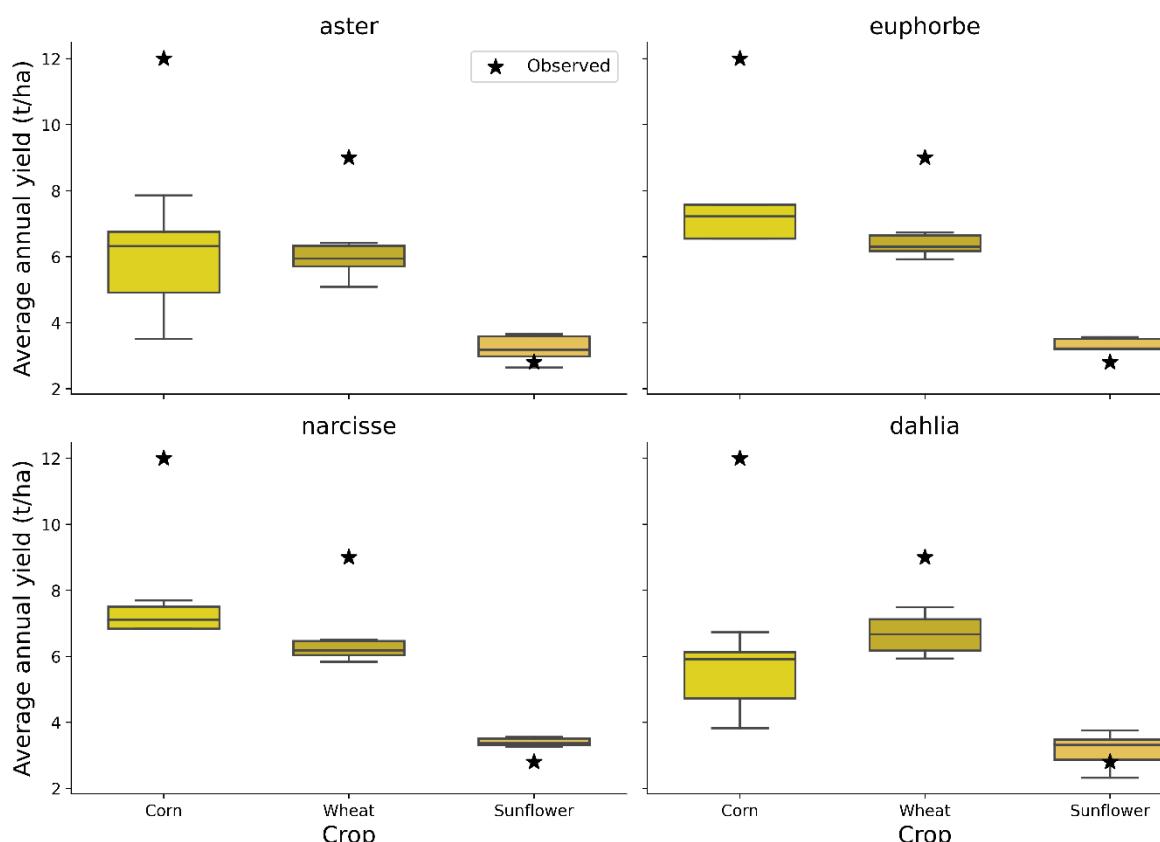


Figure 66. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture de firme.

de l'élévation des températures estivales provoquant un stress hydrique important, non compensé par une potentielle irrigation (car non retenue dans les itinéraires techniques), apparaît donc comme le principal facteur explicatif. Les scénarios climatiques Dahlia et Aster, caractérisés par des températures plus marquées durant la période de croissance estivale, conduisent aux rendements les plus faibles pour le maïs. À l'inverse, le tournesol montre une légère progression, avec un rendement moyen simulé de 3,1 t/ha, supérieur aux 2,8 t/ha observés en Alsace sur la période 2017-2023, ce que l'on retrouve également en Alsace à l'horizon 2030 ([Donatelli et al., 2015](#)).

### Lixiviation

Les résultats de lixiviation sont présentés par culture, chaque valeur étant calculée sur l'ensemble de la période culturale correspondante. Par exemple, pour le blé, la lixiviation est intégrée sur la totalité du cycle, d'octobre à juillet, sans découpage annuel. Cette approche permet d'analyser les pertes d'azote en fonction du système cultural plutôt qu'en fonction des seules variations interannuelles.

Les résultats (Figure 67) indiquent des niveaux de lixiviation d'azote relativement importants, notamment pour le maïs et le blé. Une corrélation nette est observée entre l'ampleur des apports azotés, y compris lorsqu'ils sont fractionnés, et les quantités lessivées. En revanche, le tournesol, nécessitant des apports plus faibles, présente des pertes plus faibles. Les volumes simulés présentent des valeurs inférieures à ceux obtenus pour la période actuelle, de l'ordre de 15 à 20 % de réduction selon les cultures et les années. Néanmoins, les niveaux restent suffisamment élevés pour ne pas entraîner de diminution significative des transferts azotés vers le milieu aquatique.

La comparaison entre les résultats de lixiviation des nitrates dans le sol sous la couche racinaire obtenus avec MAELIA et les charges en nitrates simulées à l'exutoire du bassin versant via SWAT+ () montre des divergences pour l'image **Agriculture de firme**. En effet, MAELIA simule une diminution du lessivage d'azote dans les sols, de l'ordre de 15 à 20 %, alors que SWAT+ indique, au contraire, une augmentation des concentrations en nitrates dans le cours d'eau pour l'ensemble des scénarios climatiques.

Cette différence peut s'expliquer en partie par la structuration agronomique des modèles. MAELIA intègre l'ensemble du système cultural, y compris les rotations, ce qui permet de modéliser les transferts d'azote d'une culture à l'autre, notamment à travers la valorisation des reliquats azotés (i.g. résidus de couverts ou amendements organiques). À l'inverse, SWAT+ considère chaque culture de manière indépendante, sans prise en compte explicite des rotations ou des effets résiduels, ce qui limite la précision de la modélisation des dynamiques azotées. Il existe des solutions pour introduire des rotations culturales dans SWAT+ mais qui restent lourdes à mettre en œuvre pour des systèmes de rotation complexes ([Fuchs et al., 2023](#)). Par ailleurs, les itinéraires techniques implantés dans SWAT+ apparaissent moins réalistes d'un point de vue agronomique, et les cultures simulées (maïs, blé, prairie et betterave) ne couvrent qu'une partie du spectre présent dans les scénarios étudiés, ce qui peut également impacter les résultats.

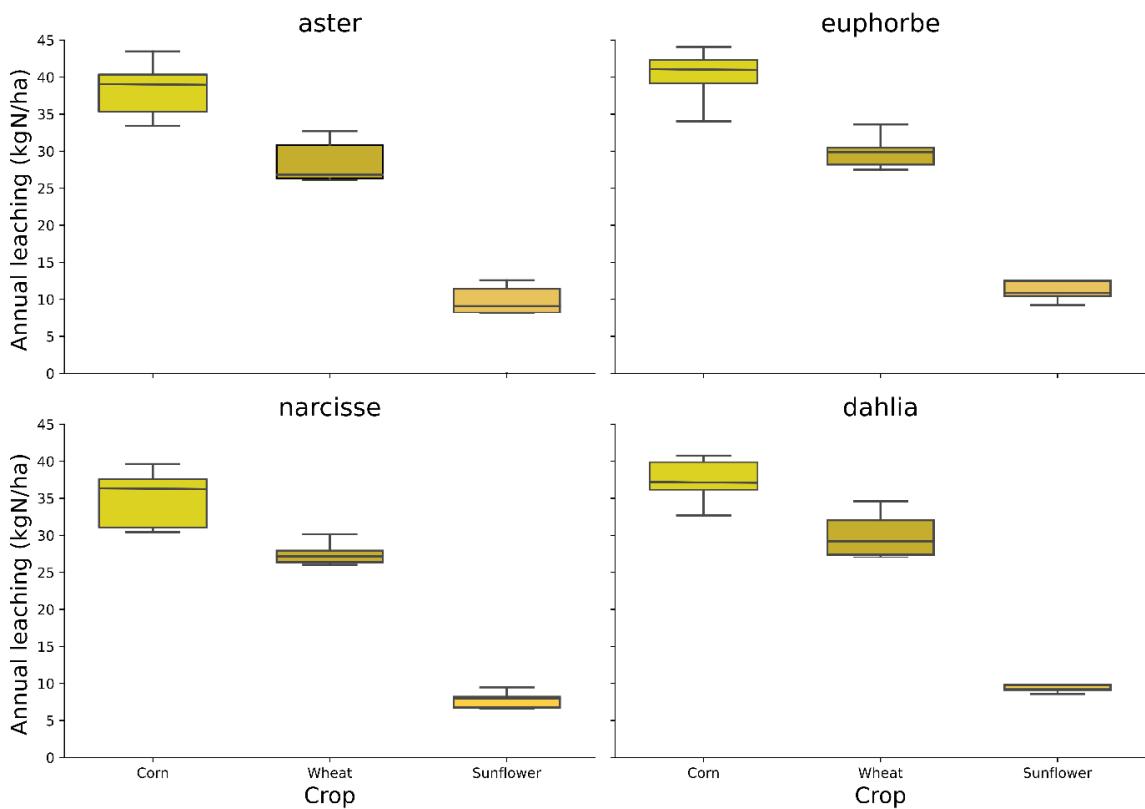


Figure 67. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture de firme.

On peut donc poser l'hypothèse que cette représentation simplifiée du territoire permet d'appréhender le niveau d'export de nitrate dans la rivière à analyser en relatif par rapport aux autres images plutôt qu'en valeurs absolues. Toutefois, ce qui est intéressant et surtout cohérent c'est que pour MAELIA et pour SWAT+, on retrouve des résultats similaires sur la variabilité des résultats de lixiviation et la concentration en nitrates dans l'exutoire en fonction des scénarios climatiques. Cela suggère que, malgré des différences structurelles, les deux modèles reproduisent de façon cohérente les mécanismes de réponse des pertes azotées aux variations climatiques.

#### Taux d'exportation du S-métolachlore

Le taux d'exportation du S-métolachlore est seulement testé dans les images **Agriculture de firme** et **Agriculture duale de modèles spatialisés** dans la mesure où les autres images excluent

Tableau 20. Pourcentage de changement des charges de nitrate à l'exutoire simulées par SWAT+ en fonction des différentes images co-construites avec les acteurs entre 2068 et 2075, (Picot, 2024).

	Période actuelle (kgN-NO <sub>3</sub> /j)	Agriculture de firme (%)	Agriculture duale spatialisé (%)	Agriculture autonome agroécologique (%)	Agriculture biologique et technologique (%)
<b>Dahlia</b>	63	+7	-8	0	-26
<b>Narcisse</b>	68	0	-16	-9	-11
<b>Aster</b>	70	+3	-18	-10	-25
<b>Euphorbe</b>	63	+10	-9	0	-25

Tableau 21. Taux d'exportation du S-métolachlore dans la Souffel pour les différentes images selon les quatre scénarios climatiques C1 à C4 entre 2068 et 2075, simulé par SWAT+ (Picot, 2024).

	Période actuelle	Agriculture de firme	Agriculture duale de modèles spatialisés
Dahlia	0.105 ± 0.040%	0.013 ± 0.005%	0.055 ± 0.036%
Narcisse	0.061 ± 0.034%	0.025 ± 0.016%	0.058 ± 0.054%
Aster	0.042 ± 0.034%	0.035 ± 0.030%	0.046 ± 0.033%
Euphorbe	0.193 ± 0.045%	0.067 ± 0.015%	0.050 ± 0.033%

l'utilisation de pesticide. On observe que pour l'image Agriculture de firme, les taux d'export sont significativement moins élevés que pour la situation actuelle, avec une réduction de l'application du S-métolachlore qui passe de 4900 kg annuellement aujourd'hui à 1495 kg pour l'image Agriculture de firme. Cette diminution de 70 % entraîne une diminution d'un ordre de grandeur, et de près de 90 % du taux d'export (Tableau 21), ce qui permet donc de diminuer significativement la pollution en S-métolachlore. Bien que cette diminution soit importante, les quantités de S-métolachlore apportées sur le territoire et exportées représentent tout de même une pollution importante dans la rivière.

### Image 2 : Agriculture duale de modèles spatialisés

#### Rendements

Les rendements simulés pour l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés** présentent une dynamique différente par rapport à l'image précédente, bien que le système de culture reste relativement simple, avec une légère réduction des apports azotés (Figure 68).

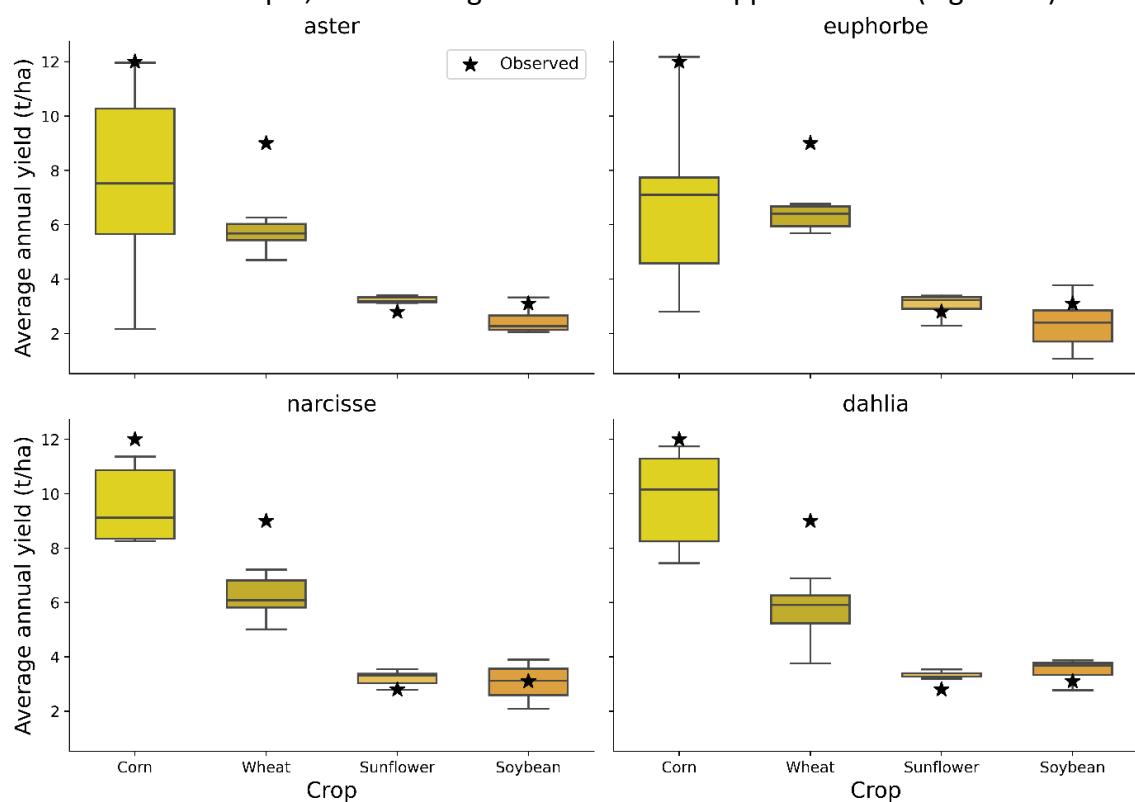


Figure 68. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par SWAT+ selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture duale de modèles spatialisés.

On observe notamment une hausse des rendements moyens du maïs, de l'ordre de 30 %, accompagnée d'une plus grande variabilité interannuelle. En revanche, les rendements du blé et du tournesol restent comparables à ceux obtenus précédemment. L'augmentation des rendements de maïs pourrait s'expliquer par la présence d'un engrais vert dans la rotation précédant cette culture, combinée à une fertilisation minérale réduite mais toujours abondante. Malgré cette amélioration, les rendements du maïs et du blé restent inférieurs à ceux observés actuellement sur le territoire. Cette image permet également d'introduire une nouvelle culture : le soja, dont l'intérêt réside dans sa capacité à réduire les besoins en azote. Les rendements simulés pour le soja sont proches des valeurs observées aujourd'hui sur le Kochersberg. Comme pour l'image précédente, les résultats varient sensiblement selon les scénarios climatiques. Le scénario Narcisse se distingue par les rendements les plus élevés. Ce scénario se caractérise par une hausse modérée des températures estivales (environ +1 °C) et hivernales, ainsi qu'une augmentation des précipitations en été (+20 %). Ces conditions contribuent à limiter le stress hydrique, ce qui favorise de meilleurs rendements.

### Lixivation

Pour cette image, on observe une réduction nette de la moyenne de lixiviation azotée d'environ 17 kgN/ha, toutes cultures confondues par rapport à l'image **Agriculture de firme** (Figure 69). Cette baisse souligne l'effet combiné d'une diminution des apports azotés et de l'intégration de cultures intermédiaires utilisées comme engrais verts dans les rotations, et donc de la réduction de la proportion de sols nus. Ces pratiques contribuent ainsi de manière significative à la réduction des pertes d'azote par lixiviation.

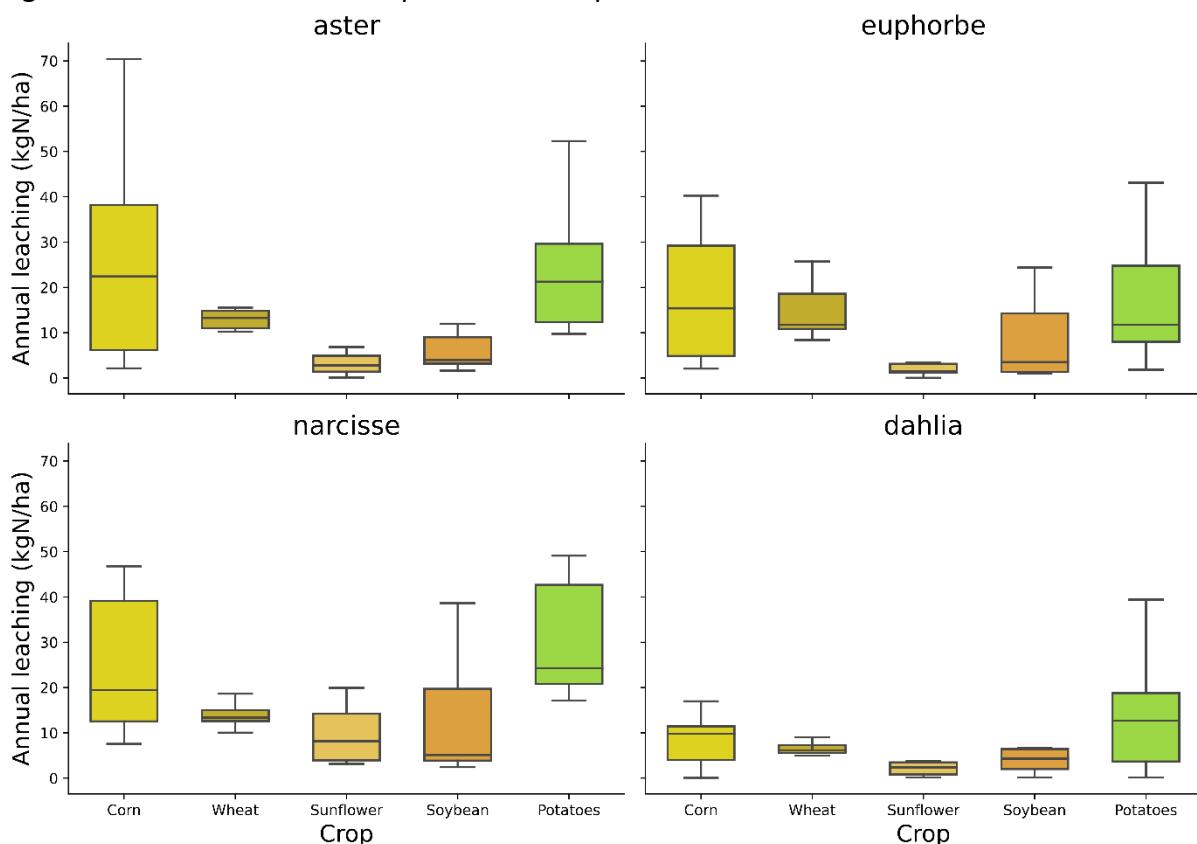


Figure 69. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture duale de modèles spatialisés.

Les résultats montrent une baisse généralisée des moyennes de lixiviation selon les cultures, mais avec une variabilité encore importante, notamment pour le maïs. Cette culture reste celle recevant le plus d'azote, tant en quantité qu'en nombre de fractionnements. Les résultats suggèrent que les sols ne sont pas toujours en mesure d'absorber l'ensemble de l'azote disponible, favorisant ainsi des pertes azotées. Enfin, les cultures recevant peu ou pas d'intrants, comme le tournesol et le soja, présentent logiquement les niveaux de lixiviation les plus faibles.

Comme pour les images précédentes, les dynamiques de lixiviation apparaissent fortement influencées par les scénarios climatiques. Une variabilité importante est observée entre scénarios, avec des disparités marquées selon les cultures. Le scénario Dahlia génère relativement peu de variabilité dans la lixiviation, ce qui pourrait indiquer que les précipitations surviennent à des moments où les sols sont couverts ou lorsque l'azote disponible a déjà été absorbé par les cultures, contrairement au scénario Narcisse.

Un point notable concerne la pomme de terre, dont la lixiviation reste élevée, autour de 18 kg N/ha, bien qu'elle soit cultivée après un engrais vert. Pour mieux comprendre cette dynamique, une analyse par année de rotation aurait été pertinente. Le système présenté repose sur une alternance de deux années de luzerne suivies de quatre années de pomme de terre. Il aurait donc été intéressant d'évaluer si les pertes par lixiviation diminuent au fil des années, ou si elles restent constantes malgré l'enchaînement des cultures.

Comme précédemment, les résultats de lixiviation azotée simulés par MAELIA peuvent être comparés aux charges de nitrates dans la rivière de la Souffel simulées par SWAT+, présentées dans le . On y observe une diminution moyenne de l'ordre de 13 % des charges de nitrates par rapport à la situation actuelle, tous scénarios climatiques confondus. En comparaison, MAELIA indique une réduction beaucoup plus marquée, d'environ 40 % pour cette même image **Agriculture duale de modèles spatialisés**. Cette différence suggère que MAELIA simule une baisse plus importante de la lixiviation entre la situation actuelle et cette trajectoire, ce que SWAT+ ne reflète que partiellement au niveau des cours d'eau.

#### *Taux d'exportation du S-métolachlore*

Pour l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés**, l'application de S-métolachlore diminue encore fortement à l'échelle du territoire, atteignant 191 kg, soit une réduction d'un facteur 40 par rapport à la situation actuelle et de près de 90 % par rapport à l'image **Agriculture de firme** (Tableau 21). Cet effort marqué sur la diminution des apports se traduit logiquement par un taux d'export plus faible que dans le scénario tendanciel. Toutefois, en comparaison avec l'image Agriculture de firme, le taux d'export observé reste légèrement plus élevé, bien qu'il demeure du même ordre de grandeur. Malgré cela, la quantité totale de S-métolachlore exportée reste nettement inférieure à celle associée à l'image Agriculture de firme, confirmant qu'une réduction significative des apports constitue le levier principal, voire le seul réellement efficace, pour limiter la présence d'herbicides dans les cours d'eau.

#### *Image 3 : Agriculture autonome agroécologique*

##### *Rendements*

La production agricole associée à l'image **Agriculture autonome agroécologique** se distingue nettement des images précédentes. Il s'agit de la seule trajectoire simulée sans apport d'intrants de synthèse, reposant exclusivement sur l'azote issu des cultures intermédiaires plantées en légumineuses, en partie utilisées comme engrains verts.

On peut voir sur la Figure 70 que les rendements observés sont plus faibles que dans les images précédentes. Pour le maïs, les rendements sont entre 2 à 3 t/ha en moyenne plus faibles, et entre 1 et 1,5 t/ha pour le blé. Le tournesol enregistre également une baisse marquée, de l'ordre de 50 %, probablement liée à l'absence d'apport azoté, malgré sa bonne tolérance à la sécheresse. En revanche, la variabilité interannuelle des rendements pour ces trois cultures reste relativement faible par rapport aux images précédentes, ce qui suggère une certaine stabilité du système malgré la faible productivité.

Cette image intègre également de nouvelles cultures comme le sorgho et le chanvre. Leurs rendements sont inférieurs aux niveaux actuellement observés sur le territoire, sauf dans les scénarios Dahlia (le plus chaud en été) et Narcisse (caractérisé par des précipitations estivales élevées). La forte variabilité observée pour ces deux cultures pourrait s'expliquer par une double contrainte : déficit hydrique et limitation en azote, malgré la présence systématique d'engrais verts en amont dans la rotation. Ces espèces, bien que rustiques et peu exigeantes en intrants, semblent toutefois sensibles aux aléas climatiques dans les conditions simulées. Enfin, le miscanthus affiche des rendements systématiquement inférieurs aux niveaux actuels. Dans MAELIA, cette culture est simulée à l'aide d'un proxy combinant un couvert de sorgho et un couvert de ray-grass italien, paramétrés pour se rapprocher des caractéristiques du miscanthus. Cette approximation peut expliquer en partie les rendements faibles observés.

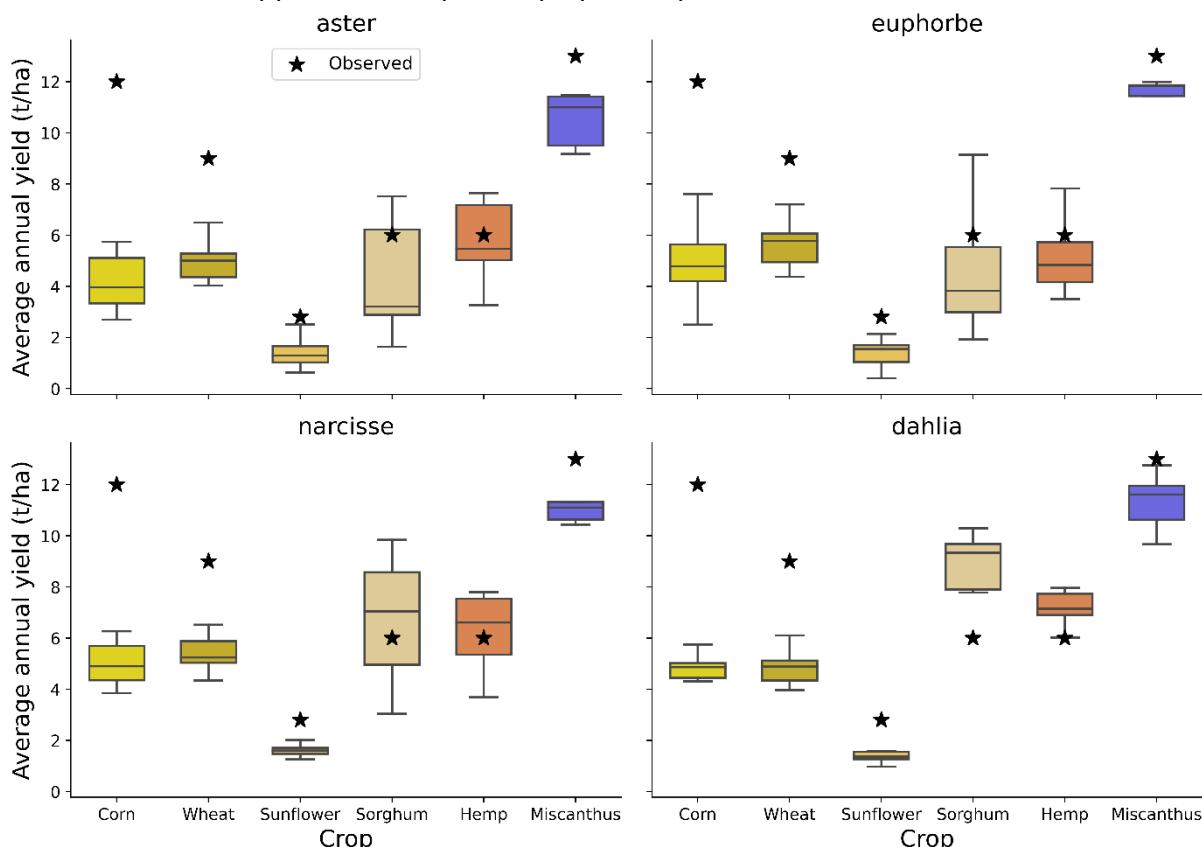


Figure 70. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture autonome agroécologique.

Comme pour les autres images, les résultats varient en fonction des scénarios climatiques. La sensibilité du système à ces conditions reste marquée, bien que la variabilité soit modérée pour certaines cultures.

### Lixiviation

La lixiviation azotée est nettement plus faible pour l'image **Agriculture autonome agroécologique**, avec une moyenne de 6,3 kg N/ha pour l'ensemble des cultures (Figure 71). Cette diminution marquée, d'environ 85 % par rapport à l'image **Agriculture de firme**, était attendue. Elle s'explique principalement par la suppression des apports d'engrais de synthèse ou organique, remplacés par des cultures intermédiaires, notamment des légumineuses utilisées partiellement comme engrains verts. Ces pratiques limitent également les périodes de sol nu, réduisant ainsi le risque de ruissellement. Ces résultats soulignent qu'une réduction modérée ou un simple fractionnement des apports azotés ne suffit pas à faire baisser significativement la lixiviation. Seule une réduction drastique, comme celle mise en œuvre dans cette image, permet de diminuer efficacement les pertes d'azote par lixiviation.

Il est cependant important de noter que la lixiviation n'est pas nulle. Les pertes observées sont principalement liées à des périodes où les cultures ne parviennent pas à absorber l'ensemble des nutriments disponibles, ou bien à des épisodes de fortes précipitations qui entraînent l'azote résiduel avant son absorption par les plantes. Des variations notables apparaissent également entre les scénarios climatiques, en particulier pour certaines cultures comme le chanvre, la pomme de terre ou le miscanthus. Dans ces cas, la lixiviation moyenne peut varier

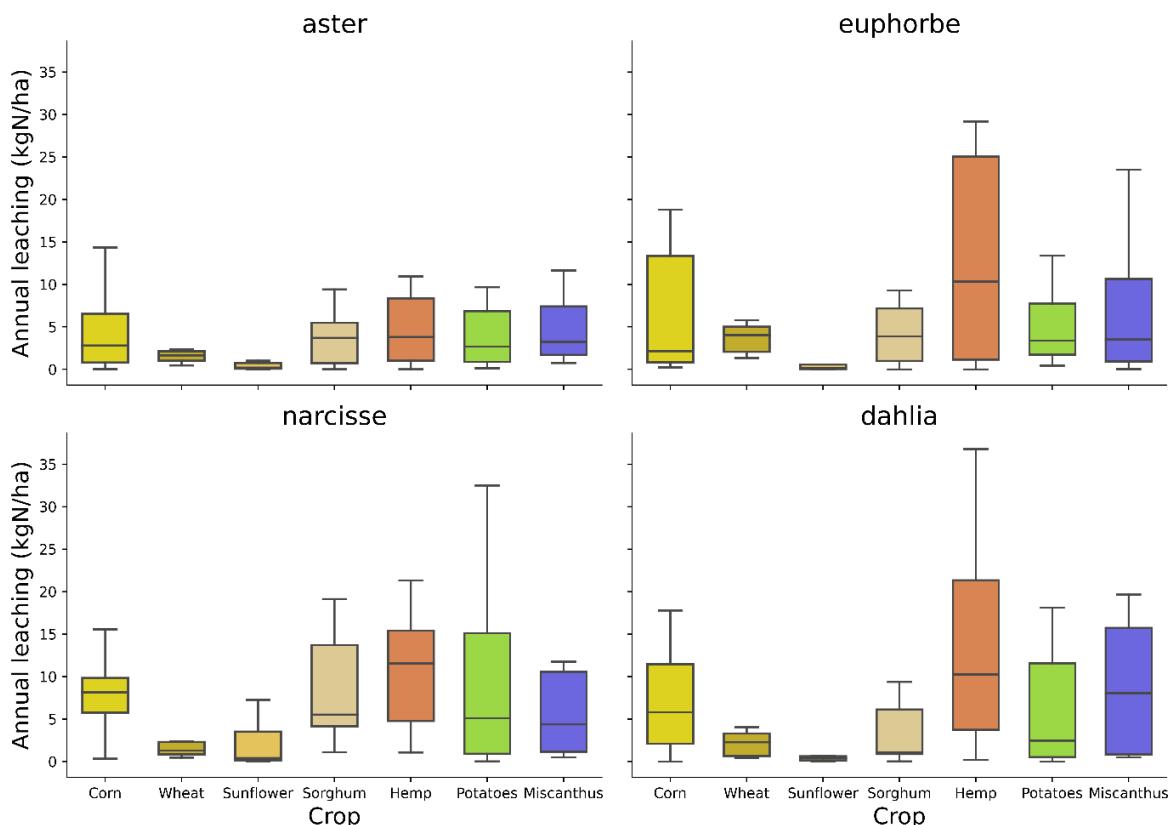


Figure 71. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture autonome agroécologique.

du simple au double selon le scénario. Ces écarts s'expliquent par la sensibilité des pertes azotées aux épisodes de pluies intenses, survenant au moment où des résidus azotés sont encore présents dans le sol. On observe également que la culture de pomme de terre présente une lixiviation environ 50 % plus faible que dans l'image précédente. L'alternance avec un pois d'hiver, dont une partie est valorisée en déchet vert, semble ainsi générer moins de lixiviation qu'un couvert permanent de luzerne maintenu pendant deux ans.

Il est également possible de comparer, toutes proportions gardées compte tenu du fonctionnement propre à SWAT+, les résultats de lixiviation des cultures avec ceux des charges de nitrates dans la rivière (Tableau 20). Il est intéressant de noter que SWAT+ ne montre pas une réduction aussi marquée des concentrations en nitrates dans le cours d'eau pour cette image, alors même que la fertilisation azotée a été entièrement supprimée.

Il est particulièrement frappant que SWAT+ ne montre pas de baisse significative des charges de nitrates dans la rivière pour cette image, alors même qu'aucune source d'azote n'est présente dans la simulation : ni fertilisation, ni cultures intermédiaires de légumineuses qui ne sont pas prises en compte dans les rotations du système de culture par le modèle, ni de déchets verts. Cela interroge sur la capacité de SWAT+ à refléter les effets d'un système sans intrants azotés. Ce problème peut également être lié à un temps trop court de chauffe du modèle ou à une mauvaise paramétrisation des apports des cultures. Ainsi, pour les scénarios climatiques Dahlia et Euphorbe, les charges de nitrates simulées dans la rivière restent équivalentes à celles des images précédentes, malgré l'absence totale de fertilisation. Pour les scénarios Narcisse et Aster, une légère baisse est observée, de l'ordre de 10 %, ce qui reste très en deçà des diminutions simulées avec MAELIA.

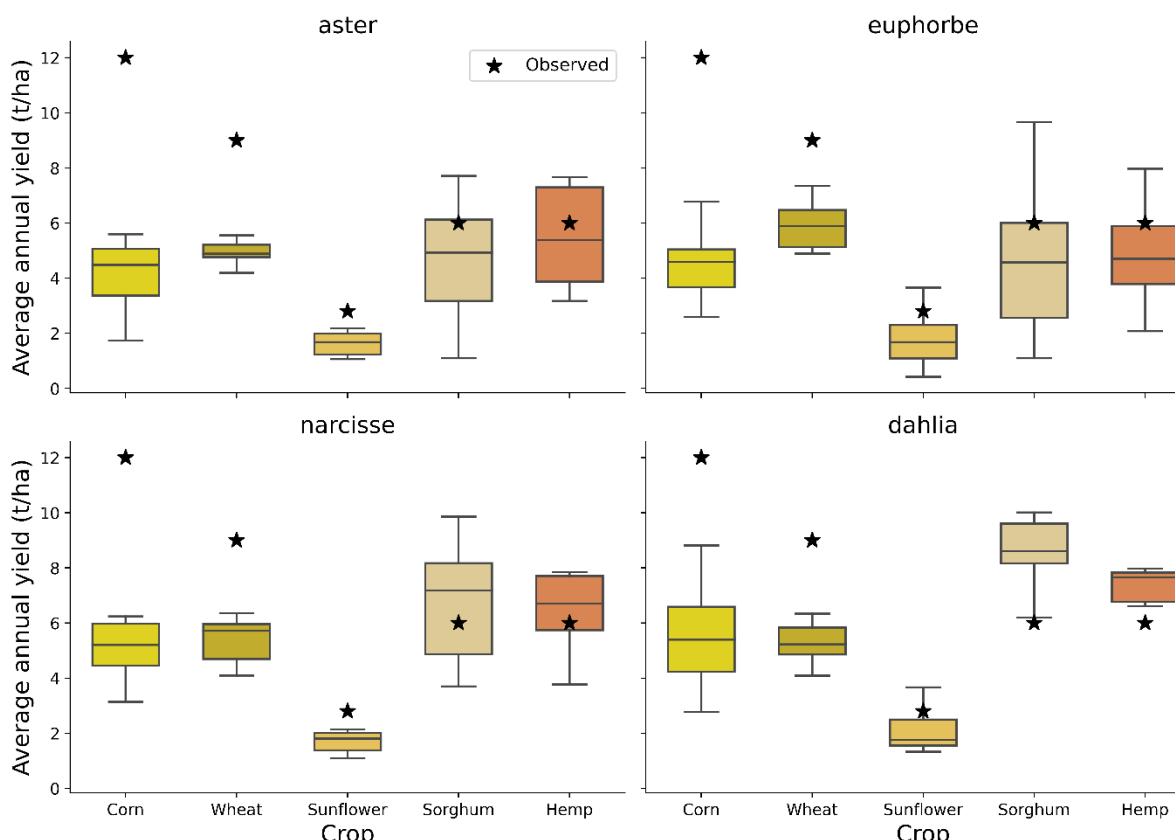


Figure 72. Distribution des rendements (t/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulés par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustaches pour l'image Agriculture biologique et technologique.

#### *Image 4 : Agriculture biologique et technologique*

##### *Rendements*

L'image **Agriculture biologique et technologique** présente des caractéristiques globalement similaires à l'image précédente, notamment en termes de pratiques agricoles et de cultures mises en place. La principale différence réside dans l'introduction d'un système d'élevage en prairie qui permet la production et l'utilisation de fumier comme amendement organique. Ce fumier est appliqué en début de cycle des cultures principales, en complément des apports d'azote issus des cultures intermédiaires utilisées comme engrains verts.

Cependant, cet apport organique reste limité. Comme le montre la Figure 72, il ne permet pas d'augmenter significativement les rendements, avec une hausse modeste de 6 % par rapport à l'image précédente. Les résultats obtenus restent donc globalement comparables à ceux observés dans l'image **Agriculture autonome agroécologique**.

##### *Lixiviation*

En ce qui concerne la lixiviation, on observe également une diminution significative des pertes azotées par rapport aux deux premières images et une augmentation mesurée de l'ordre de 10 % avec l'image précédente (Figure 73). Ainsi, la présence de fertilisation organique augmente légèrement la lixiviation, mais pas de manière significative, par rapport à l'image précédente.

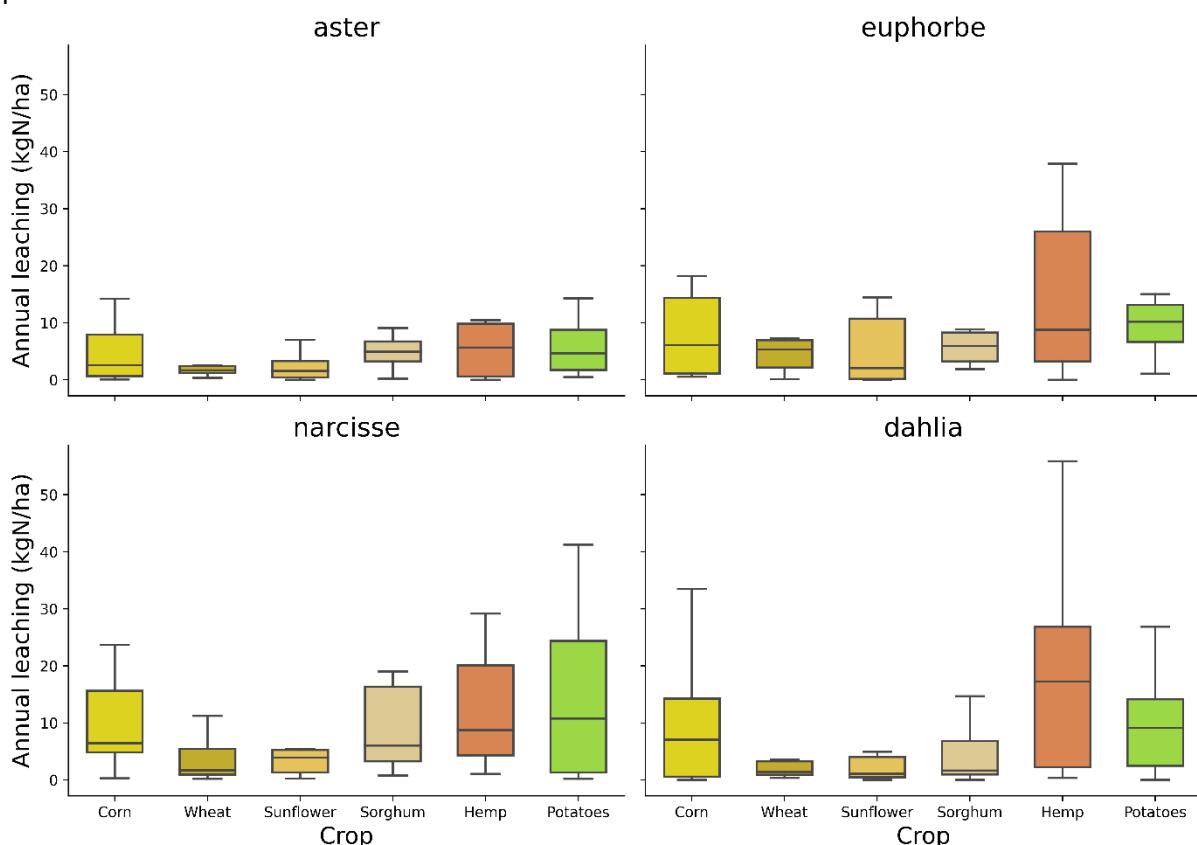


Figure 73. Distribution de la lixiviation annuelle d'azote dans les sols (kgN/ha) des cultures de 2065 à 2075 simulée par MAELIA selon les scénarios climatiques, représentée par des boîtes à moustache pour l'image Agriculture biologique et technologique.

## *Focus sur la production maraîchère*

La production de pomme de terre, représentative de la production maraîchère, est traitée séparément en raison de ses rendements généralement plus élevés que ceux des autres cultures. Il est particulièrement intéressant de comparer les résultats entre l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés**, où la production repose sur une alternance de deux années de luzerne suivies de quatre années de pomme de terre et les images **Agriculture autonome agroécologique et Agriculture biologique et technologique**, où la pomme de terre est cultivée la même année qu'un couvert intermédiaire de pois d'hiver. Dans les deux systèmes, la fertilisation azotée provient de déchets verts, mais les cultures associées et leurs temps de présence diffèrent.

La Figure 74 montre que les rendements de pomme de terre restent globalement inférieurs à la moyenne actuelle du territoire (environ 45 t/ha). Le système intégrant la rotation luzerne-pomme de terre présente des rendements moyens supérieurs de l'ordre de 70 % par rapport au second système. Cette amélioration s'accompagne d'une dispersion nettement plus importante qui traduit une variabilité interannuelle élevée. Cette variabilité, bien qu'atténuée est également forte pour le scénario climatique Narcisse pour les deux autres images.

Comme observé précédemment, les rendements sont sensibles aux scénarios climatiques, mais cette sensibilité varie selon les images. Dans tous les cas, le scénario Narcisse aboutit aux rendements moyens les plus élevés, probablement en raison de températures plus modérées et de précipitations supérieures de +20 % à celles d'aujourd'hui.

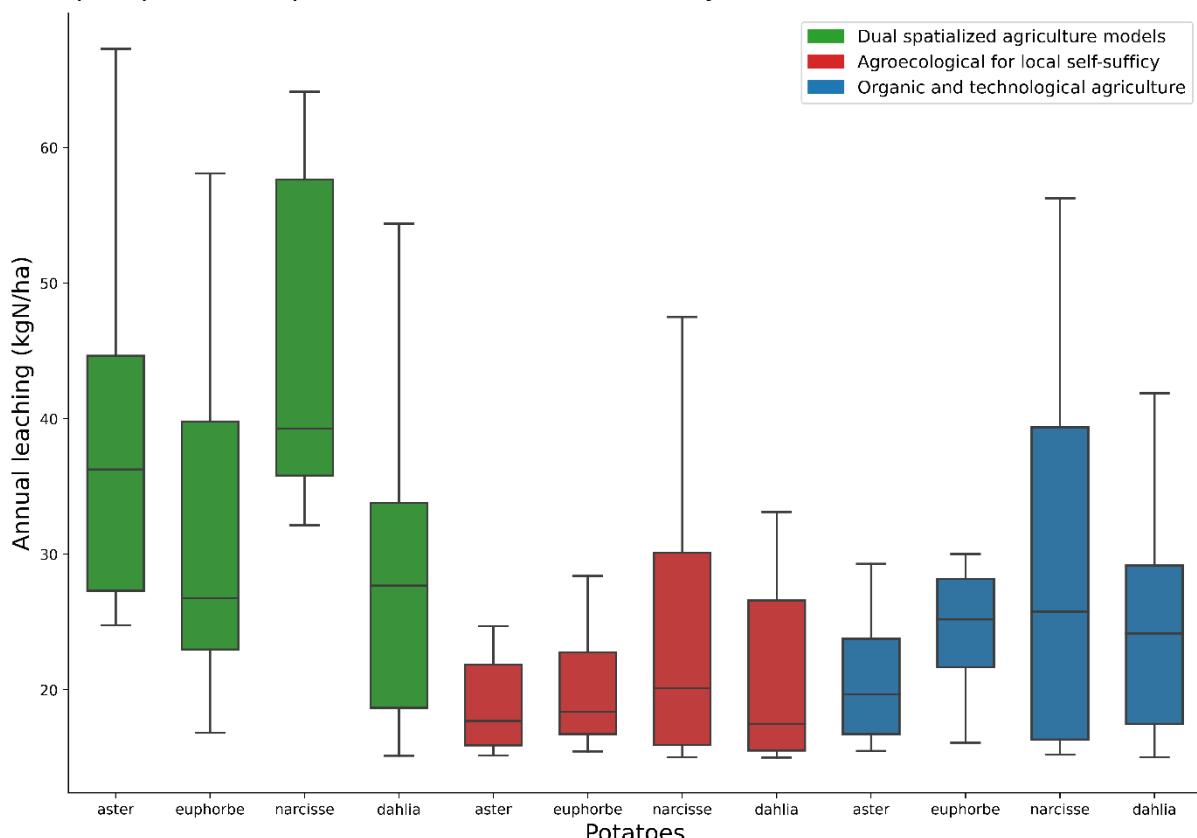


Figure 74. Comparaison des rendements de pomme de terre, selon les différentes images et scénarios climatiques, simulés par MAELIA sur la période 2065-2075

Un point notable est que les rendements de pomme de terre ont presque doublés dans l'image **Agriculture biologique et technologique** par rapport à l'image **Agriculture autonome agroécologique**, alors que les itinéraires techniques sont identiques. Une hypothèse possible réside dans la différence de localisation des parcelles de maraîchage, et donc dans la qualité des sols associés. En effet, dans l'image **Agriculture biologique et technologique**, la plupart des parcelles de production de pomme de terre se trouvent proches des sols hydromorphes colluviaux limono-argileux qui sont des sols plus profonds dont les réserves utiles sont plus grandes.

### 2.3 Satisfaction hydrique et azotée

Les variables de satisfaction azotée et hydrique sont calculées via le module AqYield NC dans MAELIA (*Constantin et al., 2015 ; Tribouillois et al., 2020*). Elles servent principalement à estimer les rendements selon une relation linéaire classique permettant d'ajuster le rendement potentiel maximal.

La satisfaction hydrique du maïs est systématiquement comprise entre 80 et près de 100 % (Figure 75). Elle est en moyenne plus importante dans les images **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique et technologique** (en moyenne 95 % sur 2065–2074) que dans les images **Agriculture de firme** et **Agriculture duale de modèles spatialisés** (en moyenne 80 %), ce qui peut suggérer que MAELIA simule correctement la perte hydrique liée à l'absence de couverture des sols. En comparaison, la modélisation du territoire sur 2015–2023 présente également une moyenne de 80 %, proche des images **Agriculture de firme** et **Agriculture duale de modèles spatialisés**.

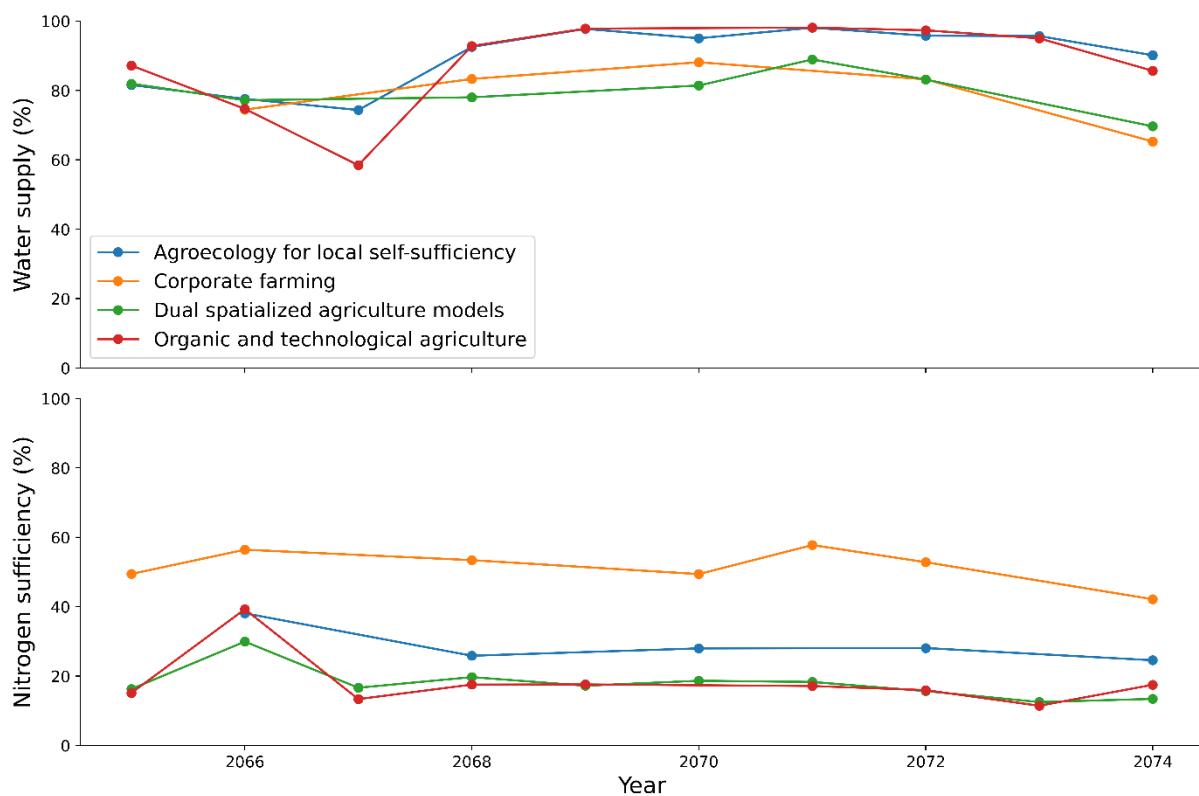


Figure 75. Satisfaction hydrique (en haut) et azotée (en bas) du maïs des différentes images simulées par MAELIA sur les périodes 2065-2074.

En revanche, la satisfaction azotée est plus faible, oscillant entre 15 et 60 %, avec des disparités marquées entre images : en moyenne 55 % pour **Agriculture de firme**, 30 % pour **Agriculture autonome agroécologique** et 15 % pour **Agriculture biologique et technologique** ainsi qu'**Agriculture duale de modèles spatialisés**. Dans l'image **Agriculture autonome agroécologique**, l'apport azoté repose uniquement sur les CIPAN et leur valorisation en déchets verts. Le modèle semble bien intégrer ce mécanisme d'apport dans la mesure où la satisfaction azotée est la deuxième plus élevée parmi les images présentées, après l'image **Agriculture de firme** où l'azote est apporté par apport fractionné d'engrais de synthèse. Les images **Agriculture biologique et technologique** et **Agriculture duale de modèles spatialisés** montrent qu'un mélange CIPAN / engrais, en quantités réduites, aboutit à une satisfaction azotée encore plus basse. Ces tendances confirment que plus l'azote biodisponible est important, moins le stress azoté est prononcé ([Schröder, 2014](#)). Le scénario tendanciel affiche quant à lui une satisfaction azotée moyenne de 35 % sur la période 2015–2022, ce qui représente une moyenne de satisfaction azotée inférieure à celle de l'image **Agriculture de firme**, malgré des doses d'apport plus élevées, probablement en raison d'une fertilisation moins ciblée que la fractionnée appliquée au moment optimal.

Les variations interannuelles restent limitées pour les deux variables ce qui peut indiquer une dépendance plus forte aux systèmes de culture qu'aux conditions climatiques. Ainsi, le forçage climatique futur ne semble pas affecter particulièrement ces variables de satisfaction hydrique et de satisfaction azotée.

### 3. Discussion

Cette partie comporte deux temps. D'abord, la discussion aborde l'intérêt, les apports et les limites de l'utilisation de modèles agro-hydrologiques complexes dans les démarches prospectives. Ensuite, l'analyse porte sur le respect ou non des critères normatifs initialement utilisés dans l'atelier de co-création des images du territoire en 2070.

#### 3.1 Usage d'un modèle conceptuel dans un exercice de prospective

##### *Avantages des modèles MAELIA et SWAT+ dans cet exercice*

Tout d'abord, il est possible de discuter du choix méthodologique opéré qui consiste à mobiliser des modèles préexistants en cherchant à exploiter au maximum leurs modules et leurs fonctionnalités, sans développer de nouvel outil. Cette démarche s'est accompagnée d'un effort pour renseigner des données d'entrée similaires dans les deux modèles. Néanmoins, les différences d'architecture et d'implémentation des deux modèles présentent certaines différences structurelles qui limitent la possibilité de comparer totalement les résultats obtenus. Par exemple, l'unité spatiale de base est différente pour les deux modèles : le HRU pour SWAT+ par rapport à l'approche par parcelle dans MAELIA, ou encore la manière d'intégrer les systèmes de culture, la prise en compte des rotations étant encore limitée dans SWAT+ ([Fuchs et al., 2023](#)) alors qu'elle est totalement intégrée dans MAELIA. Toutefois, ce choix méthodologique désigné dans ce manuscrit sous le terme *d'approche frugale* a été retenue, bien qu'elle reste peu documentée dans la littérature scientifique. Elle se rapproche néanmoins du concept de *building blocks* en modélisation ([Hines & Eberlein, 1996](#)), où chaque composant d'un modèle est considéré comme une « molécule » au sein de la dynamique

globale du système modélisé. Cette philosophie, de plus en plus mobilisée dans le développement des IAM ([Elsawah et al., 2017](#)), repose sur la réutilisation de modules génériques déjà éprouvés dans d'autres modèles, qui sont ensuite couplés entre eux ([Voinov & Shugart, 2013](#)).

Dans notre cas, cette logique n'a pas été appliquée pour développer un nouveau modèle ad hoc, mais pour combiner différents modules de modèles existants de manière à produire les résultats complémentaires attendus, tout en optimisant le temps nécessaire à leur obtention ([Warren, 2014](#)). Cette flexibilité découle de la structure modulaire des IAM. Celle-ci permet de regrouper, au sein d'un même cadre, des modules reliés par des approches conceptuelles et quantitatives, capables de représenter des interactions non linéaires et parfois complexes entre les éléments du système ([Elsawah et al., 2017](#)). L'utilisateur peut ainsi sélectionner et articuler les modules les plus pertinents au regard des objectifs visés, ce qui présente un avantage important.

Utiliser des modèles agro-hydrologiques conceptuels spatialisés présente plusieurs avantages dans le cadre de cette étude prospective. Le premier avantage des modèles SWAT+ et MAELIA est qu'il s'agit de modèles distribués, ce qui permet d'intégrer finement les disparités territoriales présentes même sur des territoires de taille petite à moyenne, comme celui étudié ici (environ 100 km<sup>2</sup>). Cette spatialisation donne la possibilité de représenter les résultats sous forme cartographique, ce qui peut faciliter leur lecture et leur interprétation. Cette dimension peut être pertinente dans un cadre participatif, car cela permet de produire des résultats directement liés aux conditions locales, de tester des jeux de données spécifiques à certaines zones et de répondre aux demandes précises des différents acteurs sur le territoire ([Allain et al., 2018](#) ; [Catarino et al., 2021](#) ; [Murgue et al., 2015](#)). Ainsi, les caractéristiques pédologiques, d'occupation du sol, les données climatique et la disparité sur les pratiques agricoles peuvent être intégrées à une échelle plutôt fine (à la parcelle pour MAELIA et au niveau du HRU pour SWAT+).

Un autre avantage des modèles conceptuels est leur nombre limité de paramètres par rapport aux modèles à base physique, qui nécessitent en outre un maillage dense pour représenter l'hétérogénéité spatiale ce qui a pour conséquence d'augmenter les temps de calcul et implique souvent un volume de paramètres plus important. Pour MAELIA et SWAT+, l'effort de paramétrisation reste conséquent, mais la majorité des gammes de valeur des paramètres requis est disponible dans des bases de données nationales ou par dire d'expert local. Comme souligné précédemment, les modèles conceptuels demandent moins de ressources de calcul et des temps de simulation réduits, ce qui facilite la réalisation de multiples simulations.

La prise en compte fine des itinéraires techniques dans ce type de modèle agro-hydrologique offre deux options qui ont été explorées dans cette étude prospective. La première consiste à représenter fidèlement les pratiques agricoles recensées sur un territoire, ce qui nécessite un important travail de collecte auprès des agriculteurs ou conseillers agricoles. Cette option poursuit une double finalité : d'une part, améliorer la compréhension des systèmes étudiés ; d'autre part, affiner l'évaluation des outils de modélisation lors de la validation des données simulées ([Troy et al., 2015](#)). Les variables de sortie testées peuvent être variées comme la reproduction des dynamiques de croissance des cultures, la lixiviation, le transport des polluants ou encore les effets de l'irrigation sur la croissance, en s'appuyant sur des pratiques déjà testées localement ([Tribouillois et al., 2020](#) ; [Murgue et al., 2015](#) ; [Rizzo et al., 2019](#) ; [Constantin et al., 2015](#)). La seconde option possible à simuler de nouvelles pratiques ou pas

encore testées à grande échelle. Ces modifications peuvent inclure l'introduction de nouvelles cultures, comme des légumineuses, dans les rotations, ou l'évaluation des impacts économiques liés à des changements dans les systèmes de culture ([Dardonville et al., 2023](#) ; [Catarino et al., 2021](#)). Ces tests permettent d'anticiper l'effet potentiel de nouvelles stratégies agricoles sous différents forçages climatiques ([Dardonville et al., 2023](#)). Dans le cadre de cette étude, cela se traduit par l'implantation de cultures comme le Miscanthus ou le soja, la réintroduction de certaines cultures comme le tournesol, l'ajustement des pratiques de fertilisation, soit en modifiant les quantités apportées, soit en recourant à une fertilisation basée sur la rotation et les déchets verts, ainsi que l'expérimentation de changements dans la diversité culturelle et la couverture des sols afin d'évaluer leurs effets sur les besoins en eau.

#### *Limites des modèles MAELIA et SWAT+ dans cet exercice*

La principale limite à l'utilisation généralisée de ces modèles agro-hydrologiques réside dans leur relative complexité de prise en main, bien qu'ils soient globalement plus accessibles que les modèles à base physique. Le choix de les utiliser est tout de même resté cohérent au regard des objectifs fixés (quantification des résultats sous différents forçages climatiques, disponibilité des données à l'échelle locale et nationale, possibilité de combiner des modules agrologiques et hydrologiques avancés) ([Kelly et al., 2013](#)). Par ailleurs, ces modèles qui sont conçus pour la recherche, sont encore en développement et disposent d'une documentation plus ou moins complète. Cette situation limite leur accessibilité et complique leur utilisation dans une perspective de généralisation de la méthode.

Bien que plusieurs raisons aient motivé le choix de ces modèles, certains points méritent d'être discutés. Le premier point porte sur le calcul des variables de stress hydrique et de stress azoté. Si les résultats mettent en évidence des tendances globales cohérentes pour ces deux variables, leurs ordres de grandeur ne semblent pas correspondre aux situations simulées. Le résultat montrant que la dynamique climatique a peu d'effet sur le stress hydrique contredit les attentes dans la mesure où l'élévation de la température moyenne entraîne une augmentation de la demande atmosphérique en eau et de la transpiration, en particulier dans un contexte de diminution des précipitations pendant la saison végétative ([Sadok et al., 2021](#)), ce que l'on peut voir avec la majorité des scénarios climatiques utilisés. Une sous-estimation du stress hydrique peut avoir des répercussions importantes sur l'évaluation des rendements ([Tribouillois et al., 2018](#) ; [Weber et al., 2018](#)). En effet, les rendements sont calculés en modulant un rendement maximal théorique par les facteurs de satisfaction hydrique et azotée. Cette représentation du stress hydrique sur la croissance des cultures est classiquement utilisée par de nombreux modèles agronomiques ou de surface ([Constantin et al., 2015](#) ; [Sellers et al., 1997](#)) mais peut parfois conduire à une sous-estimation du stress hydrique. Cette limite pourrait être atténuée en affinant dans les modèles la représentation des interactions climat-sol-végétation, mais au prix d'une complexification de ces modèles et d'une augmentation des temps de calculs par rapport aux schémas actuels ([Joetzjer et al., 2022](#)). Contrairement au stress hydrique, les résultats suggèrent que le stress azoté est plutôt surestimé. Une surestimation de stress azoté entraîne également une diminution des rendements. Cela peut également avoir des conséquences sur le niveau de lixiviation de l'azote, en l'occurrence une sous-estimation, tel que représenté par le modèle sol-culture AqYield ([Tribouillois et al., 2020](#)).

Un autre point potentiellement limitant est que MAELIA ne prend pas en compte explicitement le stress thermique. Or, les températures projetées pour 2070 vont induire des extrêmes ponctuels de températures plus élevés et plus fréquents ([Miller & Belton, 2014](#)), ce qui va influencer les seuils de tolérance à différentes étapes du développement des cultures, en particulier dans un contexte non irrigué ([Siebert et al., 2017](#)). Ces évènements, même ponctuels, peuvent provoquer des dommages irréversibles sur l'appareil photosynthétique de nombreuses cultures ([Jones, 2014](#)), affecter la viabilité des systèmes ([Stella et al., 2021](#)), induire des baisses de rendements significatives ([Knox et al., 2016](#) ; [Anwar et al., 2013](#)) et favoriser des effets connexes comme le développement de pathogènes en Europe ([Weber et al., 2018](#) ; [Miraglia et al., 2009](#)). Le modèle SWAT+ quant à lui intègre le stress thermique via le modèle de croissance de culture en fixant une température minimale et maximale quotidienne par culture qui vient faire varier le rendement maximal. Ainsi, bien qu'il s'agisse d'une prise en compte du stress thermique encore partielle<sup>12</sup>, les résultats montrent, que même en système irrigué, dans certaines conditions, le stress thermique est responsable d'une diminution importante des rendements simulés, qui peut aller jusque au moins 35 % dans certaines conditions ([Becker et al., 2023](#)).

Enfin, une limite commune à l'ensemble des modèles est la difficulté à produire des résultats prospectifs. C'est lié à la combinaison de trois principales sources d'incertitudes :

- (i) les incertitudes structurelles : comment fonctionnent les processus et quels modèles, équations, familles d'idées... choisir pour la représentation de ces processus ;
- (ii) les incertitudes paramétriques (i.e. l'absence de données mesurées sur le futur)
- (iii) l'incertitude *fondamentale* sur l'évolution du système à long terme des différentes composantes du système (agronomique, sociale, économique...), incluant une évolution complètement inconnue du système ([Elsawah et al., 2020b](#)).

Dans cet exercice, plusieurs questionnements relèvent de cette dernière catégorie. Le premier concerne les cultures elles-mêmes : certaines pourraient disparaître ou apparaître en raison de la modification des conditions climatiques ([Knox et al., 2016](#) ; [Debaeke et al., 2017](#)). Même pour les cultures conservées, les itinéraires techniques restent incertains ([Anwar et al., 2013](#) ; [Debaeke et al., 2017](#)). D'autres interrogations portent sur l'implémentation de nouvelles technologies. Par exemple, dans le scénario **Agriculture biologique et technologique**, la lutte contre les bioagresseurs passerait des herbicides à des technologies de désherbage encore inexistantes. Cela soulève des questions quant à leur faisabilité, leur coût, leur accessibilité pour les agriculteurs, ainsi que leur impact environnemental en particulier le risque de substituer la pollution par les pesticides à une dépendance accrue aux métaux rares et à l'électricité. La discussion autour des technologies rejoint celle sur le temps de travail, utilisé ici comme indicateur de l'attractivité du métier. Bien que MAELIA attribue par défaut une durée approximative à chaque opération agricole, il serait pertinent de disposer d'une variable de sortie capable d'ajuster cette estimation en fonction des conditions de travail spécifiques à chaque scénario simulé ([Martin-Clouaire & Rellier, 2009](#)). Si ce temps reste très dépendant des pratiques agricoles et des conditions de travail propres à chaque image ou scénario, il peut également être difficile parfois à appréhender. Par exemple, il semble que le temps de travail soit particulièrement sectorisé et encadré dans l'image **Agriculture de firme**, ce qui peut

---

<sup>12</sup> C'est-à-dire qu'il ne prend pas en compte explicitement les effets physiologiques du stress thermique sur la croissance des cultures (e.g. difficulté de fécondation, stérilité du pollen, vieillissement accéléré ou même stress cumulé sur plusieurs jours)

faciliter l'estimation de ces temps. Néanmoins, dans l'image **Agriculture autonome agroécologique**, les pratiques sont plus difficiles à mesurer, notamment en raison du principe retenu de mutualisation des tâches.

### 3.2 Respect des critères normatifs imposés pour la construction des images

Les critères normatifs définis et imposés pour l'atelier de co-construction d'images ont servi un double objectif. D'une part, ils ont permis de fixer un objectif désirable dans le cadre de cette démarche prospective. D'autre part, ils ont été traduits en indicateurs mesurables à travers les résultats de modélisation, principalement en termes de viabilité des rendements à long terme et de pollution azotée, via les proxys de lixiviation dans les sols et de charges de nitrates dans les cours d'eau. De plus, le rendement des cultures est également un indicateur économique indirect, car sa variabilité a des effets importants sur la fluctuation du marché agricole, avec une sensibilité particulièrement forte face aux fluctuations liées au changement climatique (*Chatzopoulos et al., 2020*).

Comme souligné dans la partie précédente, les modèles présentent une prise en compte plus ou moins détaillée des stress hydriques et thermiques qui ont des effets directs sur les rendements et la lixiviation de l'azote, ce qui peut affecter les résultats. D'autre part, les résultats obtenus doivent être interprétés à la lumière des limites des modèles utilisés, notamment leur capacité à intégrer des pratiques agricoles innovantes ou émergentes, peu représentées dans les bases de données pré-implémentées. Ces limites posent problème dans une approche prospective, où l'on chercherait justement à explorer des trajectoires de rupture.

#### *Sur la viabilité des rendements à long terme*

Dans le contexte de co-construction à l'échelle locale, des cultures représentatives du territoire ont volontairement été conservées afin, d'une part, d'améliorer l'acceptabilité de la démarche auprès des acteurs locaux, et en particulier des agriculteurs afin d'éviter de proposer des systèmes de cultures très éloignés de la réalité actuelle. D'autre part, ce choix permet d'identifier les cultures présentes et majoritaires qui pourraient rester viables à long terme et celles apparaissent déjà comme peu résilientes. L'atelier final a donc été une occasion de discuter de la nécessité et du moyen approprié pour remplacer les cultures actuellement prédominantes sur le territoire de la Souffel.

Les résultats obtenus confirment des tendances déjà bien établies dans la littérature quant à la diminution des rendements agricoles à cause des effets du changement climatique avec des baisses de rendement de l'ordre de 25 % pour le maïs non irrigué et de 15 % pour le blé (*Waldhoff et al., 2020* ; *Donatelli et al., 2015*). La question se pose donc de la pertinence de maintenir certaines cultures dans les systèmes futurs vis-à-vis de leur rentabilité. C'est par exemple le cas du maïs, qui est une culture très consommatrice d'intrants, dont l'intérêt principal réside dans son potentiel de rendement élevé. Cependant, si ce rendement final important n'est pas atteint, la pertinence de maintenir cette culture devient discutable, comme c'est le cas dans plusieurs modélisations prospectives (*Stella et al., 2021* ; *Waldhoff et al., 2020* ; *Chatzopoulos et al., 2020*). Les résultats présentés dans la partie 2 montrent en effet que le maïs nécessite des apports importants pour que les rendements soient élevés (cf.

comparaison des rendements entre les images **Agriculture de firme** et **Agriculture autonome agroécologique**, où la réduction des intrants se traduit par une chute marquée de la production). De plus, la forte variabilité interannuelle des rendements de maïs limite la prévisibilité et la rentabilité économique de cette culture (*Stella et al., 2021 ; Waldhoff et al., 2020*). À l'inverse, certaines cultures comme le blé et le tournesol présentent des rendements plus stables d'une année à l'autre (*Stella et al., 2021 ; Weber et al., 2018*), voire en augmentation pour le tournesol, ce qui est également souligné dans d'autres travaux (*Donatelli et al., 2015*). Cette stabilité relative pourrait en faire des composantes clés de systèmes agricoles futurs. La question de l'irrigation mérite une attention particulière dans ce contexte où le choix a été fait de ne pas simuler d'irrigation sur les grandes cultures. En effet, il aurait été pertinent d'explorer l'effet de l'irrigation sur des cultures peu exigeantes en eau, comme le tournesol, dont les rendements pourraient significativement augmenter sous irrigation (*Debaeke et al., 2017*).

Bien que la plupart des cultures déjà présentes sur le territoire aient été représentées dans les images, certaines nouvelles espèces ont aussi été intégrées, soit pour tester leur implantation à grande échelle, soit pour évaluer leur potentiel. C'est le cas du miscanthus qui est utilisé comme couvert permanent à vocation énergétique dont la précision des résultats de rendement peut encore être améliorée dans la mesure où un proxy a été utilisé pour le modéliser. C'est également le cas du tournesol qui a été délaissé localement mais dont le retour pourrait être favorisé par le changement climatique. Les simulations montrent que ces cultures présentent des rendements élevés malgré le forçage climatique, ce qui suggère leur possible généralisation sur le territoire. Ces résultats soulignent que le modèle permet d'explorer la réintroduction ou la diversification des espèces, et que les indicateurs de rendement peuvent servir de base de discussion avec les acteurs pour envisager l'évolution de la SAU (*Allain et al., 2020*).

Enfin, les résultats de rendement montrent une variabilité importante en fonction des scénarios climatiques. Cependant, aucune tendance systématique n'émerge malgré l'étendue des différences de précipitations et de températures. Cela suggère que les pratiques agronomiques et les systèmes de culture influencent fortement les rendements et qu'il est difficile d'attribuer la part liée au climat et la part liée aux pratiques agricoles mais que les deux sont fortement interdépendants.

Lorsqu'on analyse les images une par une, on constate que, même si les rendements diminuent globalement, l'apport de fertilisants permet de maintenir des niveaux de production relativement élevés, comme c'est le cas dans l'image **Agriculture de firme**. En revanche, pour les images **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique et technologique**, malgré des rendements plus faibles, on observe des systèmes de cultures bien plus diversifiés que ceux pratiqués aujourd'hui. Cette diversité contribue à réduire les pertes agricoles face au changement climatique, y compris dans des conditions sans intrants de synthèse, comme en agriculture biologique (*Ponisio et al., 2015*). Ces images présentent également une variabilité interannuelle des rendements plus faible qui se traduit par une plus grande stabilité, aussi bien en termes de sécurité alimentaire qu'économiques, notamment en réduisant la dépendance aux importations agricoles (*Chatzopoulos et al., 2020*).

L'un des résultats observés est la diminution des rendements, ce qui est cohérent avec d'autres travaux qui montrent une baisse d'environ 20 % pour l'agriculture biologique (*de la Cruz et al., 2023*). Néanmoins, plusieurs études soulignent que les systèmes hautement diversifiés (mélanges de couverts, légumineuses, absence de sols nus...) tendent à réduire cet écart (*Ponisio et al., 2015*). En effet, les images **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique et technologique** offrent un potentiel de production supérieur à celui des seuls rendements des cultures principales, grâce à un usage plus intensif et optimisé des sols, notamment via l'intégration systématique de couverts intermédiaires. Ces pratiques permettent à la fois d'améliorer la productivité et de limiter les pollutions, notamment azotées. Enfin, il est intéressant de souligner que l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés** qui combine une agriculture conventionnelle réglementée et une agriculture de petite échelle moins polluante, présente les rendements les plus élevés. Ce résultat suggère que la coexistence de deux modèles agricoles peut concilier niveaux de production élevés et réduction mesurée de la pollution azotée.

#### *Sur la question de la diminution de la pollution*

Les résultats obtenus et présentés à la partie 2 montrent une claire diminution de la lixiviation des nitrates entre les images. En effet, les résultats suggèrent trois choses :

(i) plus les apports d'engrais sont fractionnés, moins cela lixivie, si l'on compare les rendements obtenus pour la modélisation actuelle du territoire à l'image **Agriculture de firme**. Ce résultat confirme que la relation entre excédent d'apports azotés et pertes par lixiviation est directement proportionnelle (*Wang et al., 2019*) ;

(ii) plus on remplace les apports d'engrais de synthèse par des cultures **CIPAN** et par des déchets verts, plus la lixiviation diminue, comme on peut le voir dans l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés**. En effet, les CIPAN sont des cultures intermédiaires qui permettent particulièrement de diminuer la lixiviation azotée en piégeant les reliquats azotés des cultures précédentes et en apportant une partie des besoins en azote aux cultures principales suivantes (*Abdalla et al., 2019* ; *Tonitto et al., 2006*). La biomasse des cultures intermédiaires directement incorporée dans le sol est également un moyen d'apporter de l'azote aux cultures tout en minimisant les lixiviations azotées (*Tonitto et al., 2006*). Ce scénario illustre une amélioration de la qualité de l'eau par la réduction des flux azotés tout en gardant une agriculture basée sur les principes de l'agriculture conventionnelle ;

(iii) Un des résultats les plus probants concerne la forte réduction de la lixiviation de l'azote dans les images **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique et technologique**, avec une variabilité faible qui ne semble pas corrélée aux aléas climatiques, en particulier aux épisodes de précipitations intenses. Cette diminution peut être liée à plusieurs facteurs combinés. D'abord, ces images présentent des cas soit de suppression systématique (**Agriculture autonome agroécologique**), soit de diminution drastique de l'apport d'engrais, avec un remplacement des engrains de synthèse par des engrains organiques apportés en petite quantité (**Agriculture biologique et technologique**). De fait, la lixiviation azotée peut diminuer jusqu'à 75 %, en particulier pour les familles Brassicaceae et Poaceae, dans les cas où il y a des couverts intermédiaires, en particulier pour les couverts de légumineuses (*Nouri et al., 2022*). Ensuite, dans ces images, les sols restent toujours couverts

grâce à l'introduction systématique de cultures intermédiaires dans des rotations longues et complexes, ce qui favorise le recyclage interne de l'azote et limite les pertes dans les agroécosystèmes ([Tonitto et al., 2006](#); [Breza et al., 2023](#)). Enfin, le fait de remplacer l'entièreté ou une grande partie de l'apport en azote par les cultures CIPAN et les déchets verts permet, comme vu précédemment, de diminuer de manière importante les lixiviations d'azote tout en apportant de l'azote aux cultures ([Abdalla et al., 2019](#) ; [Tonitto et al., 2006](#)).

La diminution, voire l'arrêt de la fertilisation exogène s'accompagne cependant d'une baisse de rendement importante et de la nécessité de mettre en place des systèmes agricoles plus complexes (associations de cultures, compostage, rotations longues). Le fait d'apporter des engrains organiques, en particulier du fumier, en moindre quantité n'a pas d'effet significatif sur la lixiviation, une petite augmentation seulement est observée. Si l'apport de fumier dans des quantités assez faibles ne permet pas d'augmenter significativement les rendements à court terme, l'apport de fumier peut améliorer la fertilité du sol et donc les rendements à long terme ([Herencia et al., 2007](#)).

Ces résultats tendent à montrer que le cycle de l'azote, et en particulier le lien entre fertilisation et lixiviation et en particulier la diminution de la lixiviation lors de la non présence de sols nus est correctement représenté dans AqYield ([Tribouillois et al., 2020](#)).

De la même manière que pour les rendements, la variabilité climatique des différents scénarios climatiques ne permet pas de dégager une tendance lourde sur le risque de lixiviation des nitrates. Ce résultat vient confirmer la forte interdépendance entre les pratiques agronomiques et le climat, ce qui milite d'autant plus pour l'utilisation d'un modèle qui peut prendre en compte une diversité de pratiques et de cultures en rotation comme dans MAELIA et dans une moindre mesure dans SWAT+.

Enfin, l'utilisation de SWAT+ pour comparer les images en terme de risque de transport de d'herbicide à l'échelle du bassin versant a montré le potentiel pour hiérarchiser les images et les différentes projections climatiques. Seul un herbicide sur culture de printemps, le S-métolachlore largement utilisé avant son interdiction récente, a été utilisé. Une analyse plus systémique de l'impact d'une culture nécessiterait un effort supplémentaire pour intégrer la variété de produits commerciaux utilisés comme herbicides, fongicides et insecticides. Dans un exercice de prospective, la projection dans le futur de logiques de traitements phytosanitaires actuels, constitue une très forte incertitude. On observe ainsi un nombre croissant d'interdiction de molécules actives associées à l'amélioration des connaissances

*Tableau 22. Validation des critères normatifs selon les résultats de modélisation pour chaque image (X: non, ✗: non mais, ✓: oui).*

Images	Viabilité des rendements à long terme	Diminution de la pollution à long terme
Agriculture de firme	X	X
Agriculture duale de modèles spatialisés	✓	✗
Agriculture autonome agroécologique	✗	✓
Agriculture biologique et technologique	✗	✓

scientifiques sur les risques sanitaires et environnementaux associés à leur utilisation ([Leenhardt et al., 2022](#)).

Pour résumer, concernant la conformité des critères normatifs au regard des résultats de modélisation, les différentes images y répondent de manière contrastée, comme le montre le Tableau 22.

L'image **Agriculture de firme** peut être directement disqualifiée : elle ne satisfait aucun des critères retenus. Sur le plan des rendements, même si les baisses ne sont pas totalement catastrophiques, les cultures principales (maïs, blé) perdent en productivité sans qu'aucune autre production, en particulier les cultures intermédiaires, ne compense cette diminution. Dans ce contexte, et compte tenu du coût élevé des intrants et de la mécanisation, ce système ne présente plus d'intérêt économique. De plus, cette image échoue totalement à réduire la pollution. En effet, ni la lixiviation d'azote, ni la charge en nitrates, ni le transport d'herbicides ne sont améliorés à long terme.

L'image **Agriculture duale de modèles spatialisés** obtient des résultats plus favorables. La diversification, même limitée, des cultures permet de maintenir des rendements plus intéressants, bien que ceux-ci demeurent fortement soumis à la variabilité climatique interannuelle. Concernant la pollution, les changements de pratiques dans une partie des exploitations contribuent à réduire les lixiviations d'azote, mais de façon encore insuffisante : les flux d'azote dans les sols et les rivières se maintiennent à des niveaux moyens. Ces résultats, bien qu'imparfaits, apparaissent néanmoins encourageants en comparaison avec la situation actuelle.

Enfin, les images **Agriculture autonome agroécologique** et **Agriculture biologique technologique** conduisent à des rendements principaux significativement inférieurs aux niveaux actuels. Toutefois, cette baisse est partiellement compensée par la production de cultures intermédiaires et par une plus grande diversité des systèmes de culture. Ceux-ci se révèlent également plus stables dans le temps, car moins sensibles aux aléas climatiques interannuels. Du point de vue de la pollution, ce sont les seules images qui permettent d'atteindre les objectifs fixés via respectivement une suppression et une atténuation drastique de l'apport d'engrais exogène et une suppression commune des pesticides.

## Conclusion

Pour conclure, les résultats obtenus à partir des modèles agro-hydrologiques ouvrent la possibilité d'envisager plusieurs futurs agricoles et de nourrir la discussion avec les acteurs lors du dernier atelier. Ces résultats respectent des ordres de grandeurs cohérents. Les résultats les plus saillants sont que l'ensemble des rendements des cultures, non irriguées dans les quatre images, est amené à diminuer à cause des effets du changement climatique, en moyenne de 30 % toutes images confondues, avec une modulation assez forte en fonction des systèmes de culture modélisés. L'autre résultat majeur est que la diminution totale ou drastique d'apport d'engrais de synthèse est le seul moyen de diminuer efficacement les lixiviations d'azote, couplés à une couverture des sols permanente.

Les modèles agro-hydrologiques présentent des avantages qui sont leur capacité de spatialisation, une représentation correcte de plusieurs processus agro-hydrologiques et la possibilité de transformer les sorties en indicateurs directement mobilisables dans l'échange avec les parties prenantes. Ces avantages sont toutefois contrebancés par des limites importantes observées sur le territoire de la Souffel : sous-estimation du stress hydrique, surestimation du stress azoté, absence de prise en compte explicite du stress thermique. Ces biais orientent l'usage de ces modèles davantage vers l'identification de tendances lourdes que vers la production de résultats chiffrés précis. Cette limite est particulièrement sensible dans le cadre cet exercice de prospective, où la mobilisation des acteurs repose largement sur la modélisation comme support de réflexion et de projection.

Enfin, recourir à des modèles plus complexes ou en développer de nouveaux pour corriger ces limites n'apparaît pas pertinent au regard de l'objectif initial de frugalité. L'utilisation de modèles préexistants comme SWAT+ et MAELIA a permis de gagner du temps par rapport à la création d'un outil ad hoc, mais elle ne peut être qualifiée de véritablement frugale, compte tenu de la complexité et du temps requis pour les différentes étapes de mise en œuvre. Dans la perspective d'une méthodologie généralisable, il paraît donc légitime de s'interroger sur la pertinence de mobiliser de tels modèles, alors que des ordres de grandeur similaires auraient pu être obtenus à partir de la littérature ou d'études locales, par exemple celles des chambres d'agriculture. Les résultats issus de la modélisation permettent tout de même de tester des systèmes complexes de rotation sur lesquels il n'existe pas forcément de références locales et de consolider scientifiquement certains concepts en fournissant des données quantitatives à l'échelle locale, facilitant ainsi leur discussion et leur appropriation collective.

## Références

- Abbas, S. A., Bailey, R. T., White, J. T., Arnold, J. G., White, M. J., Čerkasova, N., & Gao, J. (2024). A framework for parameter estimation, sensitivity analysis, and uncertainty analysis for holistic hydrologic modeling using SWAT+. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(1), 21-48. <https://doi.org/10.5194/hess-28-21-2024>
- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M. & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global change biology*, 25(8), 2530-2543.
- Allain, S., Plumecocq, G., & Leenhardt, D. (2020). Linking deliberative evaluation with integrated assessment and modelling: A methodological framework and its application to agricultural water management. *Futures*, 120, 102566.
- Anwar, M. R., Liu, D. L., Macadam, I., & Kelly, G. (2013). Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and applied climatology*, 113(1), 225-245.
- ARAA .(2017). Evaluation des modifications des pratiques de gestion de l'azote des agriculteurs agr'eau Kochersberg. Rapport.
- Becker, R., Schüth, C., Merz, R., Khaliq, T., Usman, M., Aus der Beek, T. & Schulz, S. (2023). Increased heat stress reduces future yields of three major crops in Pakistan's Punjab region despite intensification of irrigation. *Agricultural Water Management*, 281, 108243.
- Breza, L. C., Mooshammer, M., Bowles, T. M., Jin, V. L., Schmer, M. R., Thompson, B., & Grandy, A. S. (2023). Complex crop rotations improve organic nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 177, 108911.
- Catarino, R., Therond, O., Berthomier, J., Miara, M., Mérot, E., Misslin, R. & Angevin, F. (2021). Fostering local crop-livestock integration via legume exchanges using an innovative integrated assessment and modelling approach based on the MAELIA platform. *Agricultural systems*, 189, 103066.
- Chatzopoulos, T., Domínguez, I. P., Zampieri, M., & Toreti, A. (2020). Climate extremes and agricultural commodity markets: A global economic analysis of regionally simulated events. *Weather and Climate Extremes*, 27, 100193.
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., & Therond, O. (2015). The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 55-68.
- Dardonville, M., Catarino, R., & Therond, O. (2023). Sustainability and resilience against climate change provided by a territorial crop-livestock system. *Journal of Cleaner Production*, 432, 139646.
- Debaeke, P., Casadebaig, P., Flenet, F., & Langlade, N. (2017). Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *OCL Oilseeds and fats crops and lipids*, 24(1), 15-p.
- de la Cruz, V. Y. V., Cheng, W., & Tawaraya, K. (2023). Yield gap between organic and conventional farming systems across climate types and sub-types: A meta-analysis. *Agricultural Systems*, 211, 103732.
- Donatelli, M., Srivastava, A. K., Duveiller, G., Niemeyer, S., & Fumagalli, D. (2015). Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. *Environmental Research Letters*, 10(7), 075005.
- Droz, B., Drouin, G., Lohmann, J., Guyot, B., Imfeld, G., & Payraudeau, S. (2025). How combining multi-scale monitoring and compound-specific isotope analysis helps to evaluate degradation of the herbicide S-metolachlor in agro-ecosystems?. *EGUphere*, 2025, 1-27.
- Elsawah, S., Pierce, S. A., Hamilton, S. H., Van Delden, H., Haase, D., Elmahdi, A., & Jakeman, A. J. (2017). An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environmental Modelling & Software*, 93, 127-145.
- Elsawah, S., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Rothman, D., Schweizer, V., Trutnevyyte, E., & van Delden, H. (2020a). Scenario processes for socio-environmental systems analysis of futures: a review

of recent efforts and a salient research agenda for supporting decision making. *Science of the Total Environment*, 729, 138393.

Elsawah, S., Filatova, T., Jakeman, A. J., Kettner, A. J., Zellner, M. L., Athanasiadis, I. N. & Lade, J. (2020b). Eight grand challenges in socio-environmental systems modeling. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 2, 16226.

Fuchs, M., Gebler, S., & Lorke, A. (2023). Estimating high resolution exposure at landscape-level.

Gatel, L., Lauvernet, C., Carluer, N., Weill, S., & Paniconi, C. (2020). Sobol Global Sensitivity Analysis of a Coupled Surface/Subsurface Water Flow and Reactive Solute Transfer Model on a Real Hillslope. *Water*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/w12010121>

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E. & Viennot, P. (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6).

Herencia, J. F., Ruiz-Porras, J. C., Melero, S., Garcia-Galavis, P. A., Morillo, E., & Maqueda, C. (2007). Comparison between organic and mineral fertilization for soil fertility levels, crop macronutrient concentrations, and yield. *Agronomy journal*, 99(4), 973-983.

Hines, J., & Eberlein, R. (1996). Molecules for modelers. *Proceedings of the International System Dynamics Society*. Cambridge: System Dynamics Society.

Joetzjer, E., Maignan, F., Chave, J., Goll, D., Poulter, B., Barichivich, J. & Ciais, P. (2022). Effect of tree demography and flexible root water uptake for modeling the carbon and water cycles of Amazonia. *Ecological modelling*, 469, 109969.

Jones, H. G. (2014). *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge university press.

Kelly, R. A., Jakeman, A. J., Barreteau, O., Borsuk, M. E., ElSawah, S., Hamilton, S. H. & Voinov, A. (2013). Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental modelling & software*, 47, 159-181.

Knox, J., Daccache, A., Hess, T., & Haro, D. (2016). Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe. *Environmental Research Letters*, 11(11), 113004.

Leenhardt, S., Mamy, L., Pesce, S., Sanchez, W., Achard, A., Amichot, M., Artigas, J., Aviron, S., Barthélémy, C., Beaudoin, R., Bedos, C., Bérard, A., Berny, P., Bertrand, C., Bertrand, C., Betouille, S., Bureau-Point, E., Charles, S., Chaumot, A., Chauvel, B., Coeurdassier, M., Corio-Costet, M.F., Coutellec, M.A., Crouzet, O., Doussan, I., Faburé, J., Fritsch, C., Gallai, N., Gonzalez, P., & Tournebize, J. (2022). Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. *Synthèse du rapport d'ESCo, INRAE - Ifremer* (France).

Legrand, M. (2020). Diagnostic agraire du Kochersberg, région agricole aux portes de Strasbourg. Mémoire de fin d'études, AgroParitech.

Marson, P., Corre, L., Soubeyroux, J. M., Sauquet, E., Robin, Y., Vrac, M., & Dubois, C. (2024). *Explore2—Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées* (Doctoral dissertation, METEO FRANCE; INRAE; Institut Pierre-Simon Laplace).

Martin-Clouaire, R., & Rellier, J. P. (2009). Modelling and simulating work practices in agriculture. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4(1-2), 42-53.

Miller, K. A., & Belton, V. (2014). Water resource management and climate change adaptation: a holistic and multiple criteria perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19, 289-308.

Miraglia, M., Marvin, H. J. P., Kleter, G. A., Battilani, P., Brera, C., Coni, E. & Vespermann, A. (2009). Climate change and food safety: an emerging issue with special focus on Europe. *Food and chemical toxicology*, 47(5), 1009-1021.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2015). Toward integrated water and agricultural land management: Participatory design of agricultural landscapes. *Land use policy*, 45, 52-63.

Nóia-Júnior, R. D. S., Martre, P., Deswarthe, J. C., Cohan, J. P., Van der Velde, M., Webber, H. & Asseng, S. (2025). Past and future wheat yield losses in France's breadbasket. *Field Crops Research*, 322, 109703.

Nouri, A., Lukas, S., Singh, S., Singh, S., & Machado, S. (2022). When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(15), 4736-4749.

Payraudeau, S., Imfeld, G. (2021). Bassin versant de la Souffel : Fonctionnement hydrologique, transport & devenir des pesticides - saison culturelle 2019. Projet PolISO.

Picot, M. (2024). *How to predict of water quality and quantity trajectories under climate and agricultural changes ? – application to the Souffel catchment (67)*. Rapport de fin d'étude, ENGEES, 74 p.

Picot M., Weidenfeld L., Fernandez S., Barbier R., Payraudeau S., 2024. Predicting the quantitative and qualitative evolution of water resources of an agricultural catchment under contrasted climate change scenarios, using SWAT+. International SWAT Conference, July 8-12, Strasbourg, France, Best Student Oral Presentation Award.

Ponisio, L. C., M'Gonigle, L. K., Mace, K. C., Palomino, J., De Valpine, P., & Kremen, C. (2015). Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1799), 20141396.

Rizzo, D., Therond, O., Lardy, R., Murgue, C., & Leenhardt, D. (2019). A rapid, spatially explicit approach to describe cropping systems dynamics at the regional scale. *Agricultural Systems*, 173, 491-503.

Sadok, W., Lopez, J. R., & Smith, K. P. (2021). Transpiration increases under high-temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 2102-2116.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D. & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.

Sellers, P. J., Dickinson, R. E., Randall, D. A., Betts, A. K., Hall, F. G., Berry, J. A. & Henderson-Sellers, A. (1997). Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275(5299), 502-509.

Schröder, J. J. (2014). The position of mineral nitrogen fertilizer in efficient use of nitrogen and land: a review. *Natural resources*, 5(15), 936.

Siebert, S., Webber, H., Zhao, G., & Ewert, F. (2017). Heat stress is overestimated in climate impact studies for irrigated agriculture. *Environmental Research Letters*, 12(5), 054023.

Sillard, R. (2022). *Evolution quantitative des ressources en eau d'un bassin versant agricole de 2022 à 2100 en contexte de dérèglement climatique - bassin versant de la Souffel (Bas-Rhin) avec les modèles hydrologiques SWAT+ et GR4J*. Mémoire de Master 2, Université de Strasbourg, 50 p.

Stella, T., Webber, H., Olesen, J. E., Ruane, A. C., Fronzek, S., Bregaglio, S. & Ewert, F. (2021). Methodology to assess the changing risk of yield failure due to heat and drought stress under climate change. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104033.

Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1). <https://doi.org/10.1029/2005WR004723>

Tonitto, C., David, M. Á., & Drinkwater, L. E. (2006). Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(1), 58-72.

Tribouillois, H., Constantin, J., Willaume, M., Brut, A., Ceschia, E., Tallec, T. & Therond, O. (2018). Predicting water balance of wheat and crop rotations with a simple model: AqYield. *Agricultural and forest meteorology*, 262, 412-422.

Tribouillois, H., Constantin, J., Guillon, B., Willaume, M., Aubrion, G. & Therond, O. (2020). AqYield-N: A simple model to predict nitrogen leaching from crop fields.

- Troy, T. J., Pavao-Zuckerman, M., & Evans, T. P. (2015). Debates—Perspectives on socio-hydrology: Socio-hydrologic modeling: Tradeoffs, hypothesis testing, and validation. *Water Resources Research*, 51(6), 4806-4814.
- Voinov, A., & Shugart, H. H. (2013). 'Integronsters', integral and integrated modeling. *Environmental Modelling & Software*, 39, 149-158.
- Waldhoff, S. T., Wing, I. S., Edmonds, J., Leng, G., & Zhang, X. (2020). Future climate impacts on global agricultural yields over the 21st century. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114010.
- Wang, Y., Ying, H., Yin, Y., Zheng, H., & Cui, Z. (2019). Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis. *Science*
- Warren, K. (2014, July). Agile SD: fast, effective, reliable. In *Proceedings of the 32nd International Conference of the System Dynamics Society. Presented at the Conference of the System Dynamics Society, Systems Dynamics Society*.
- Webber, H., Ewert, F., Olesen, J. E., Müller, C., Fronzek, S., Ruane, A. C. & Wallach, D. (2018). Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature communications*, 9(1), 4249.

## Chapitre 6 : Perception et appropriation des images par les acteurs

Ce chapitre présente le déroulé ainsi que les résultats du troisième et dernier atelier de la démarche, consacré à la mise en discussion des résultats de modélisation des images avec les acteurs locaux. Cet atelier poursuivait deux objectifs principaux. Le premier était de confronter les résultats issus des simulations des différentes images avec les acteurs qui avaient participé à leur construction afin d'en évaluer la crédibilité et la désirabilité. Le second objectif consistait à identifier et à discuter collectivement un ensemble de mesures et de dispositifs d'action publique susceptibles de rendre atteignables certaines de ces images.

Le contexte de cet atelier est particulier, puisqu'il a été mené en collaboration avec l'AERM et le SDEA dans le cadre du Contrat Territorial Eau et Climat (CTEC). Ce contrat est négocié entre l'agence et les acteurs d'un territoire. Il concerne les enjeux liés à l'eau et à la biodiversité. Généralement, il est établi pour une durée de quatre ans et renouvelable et associe à sa signature un engagement précis sur un programme d'action négocié, accompagné d'un calendrier de mise en place. Ces contrats offrent l'avantage d'assurer une visibilité financière pour les différents porteurs de projets. Sur le territoire de la Souffel, un premier CTEC a été mis en œuvre sur la période 2020-2024, porté par le SDEA, et a été reconduit pour la période 2025-2029. L'atelier décrit dans ce chapitre s'inscrivait donc à la fois comme l'un des ateliers préliminaires à ce nouveau CTEC qui visait à délimiter les mesures possiblement financées par l'AERM à court terme face aux enjeux du territoire et comme le dernier atelier de la méthodologie développée dans le cadre de cette thèse.

Dans une dernière partie, les résultats seront discutés dans le but de répondre à ces deux questions de recherche préalablement posées :

- Est-il possible de construire localement une alternative à un système dominant très verrouillé ?
- La prospective agro-hydrologique via ses outils images et modélisation permet-elle de mobiliser les acteurs et d'engager un changement de pratique agricoles dans une optique d'amélioration qualitative et quantitative des ressources en eau ?

### 1. Déroulé de l'atelier

Ce dernier atelier s'est tenu environ un an après le deuxième (création des images), ce qui a entraîné un renouvellement important des participants, en particulier du côté des agriculteurs, puisqu'aucun de ceux présents initialement n'a pris part à cette nouvelle séance. Le facteur de priorisation des travaux agricoles a également été mis en avant par les précédents participants au panel agriculteur. Le roulement observé chez les représentants institutionnels a également contribué à une certaine variabilité dans la composition du groupe d'une année à l'autre. En revanche, 7 nouveaux agriculteurs, engagés dans les opérations Agr'eau Souffel, ont rejoint la démarche, représentant près de la moitié des participants de cet atelier. L'atelier a finalement réuni un total de 18 participants, parmi lesquels 6 avaient déjà participé aux ateliers précédents, tous issus du panel « animateurs » (cf. Tableau 8).

Le déroulé de l'atelier a été organisé de la manière suivante :

**Séquence 1 : Présentation des images modélisées (30')**

- Présentation de la méthodologie utilisée pour la construction des images ET leur modélisation
- Présentation des 4 images agricoles et climatiques
- Mise en évidence des critères de « viabilité » des images à travers les rendements par culture / type de culture sur la période 2065-2075, dans le cas de 4 scénarios climatiques

**Séquence 2 : Discussion prospective des images (45')**

Réactions et discussion des résultats présentés :

- Quels enseignements face aux résultats à long terme présentés ?
- Dans quelle mesure ces futurs présentés semblent crédibles ?
- Quelles autres hypothèses auriez-vous souhaité que nous testions ?

**Séquence 3 : Partage d'informations sur la situation actuelle des différents dispositifs/outils tels qu'ils sont mobilisés (30')**

Donner la parole au SDEA et AERM dans le cadre du CTEC sur les outils d'action publique déjà à disposition aujourd'hui

**Séquence 4 : Proposition de pistes d'action à court terme (1h)**

- Travail en petit groupe (45') : construction d'une feuille de route (pour l'action publique ET pour l'action privée) pour aller vers une des images présentées ou un mix : les participants (en petits groupes) choisissent de travailler sur une image et travaillent à identifier les actions qui devraient être mises en œuvre dans les 5 années à venir pour initier une trajectoire vers le futur choisi
- Restitution (15') : chaque groupe présente succinctement la feuille de route qui permet d'atteindre « son » image

**Séquence 5 : Conclusion et discussion collective (15')**

Discussion libre sur le travail effectué et sur d'éventuelles suites qui devraient/pourraient être données

## 2. Résultats

La partie résultat est structurée en deux parties. La première rend compte de la réception des résultats de modélisation par les participants, en particulier de leur crédibilité et des réactions qu'ils ont suscitées. Elle regroupe ainsi les remarques relatives aux images produites, qu'il s'agisse de points jugés insuffisamment détaillés ou de limites perçues par les acteurs, et correspond aux résultats des séquences une et deux. La seconde partie présente les solutions concrètes à court terme qui ont été identifiées au cours des séquences quatre et cinq précédemment décrites. Les solutions proposées par les participants correspondent à une des mises en place potentielles d'une image particulière ou d'un mix d'images proposées.

## 2.1 Réception des images par les participants

### *Réactions directes aux résultats*

Lors de la présentation des résultats de modélisation, plusieurs interventions sont venues principalement du panel d'agriculteurs, qui ont réagi de manière directe aux projections présentées. La première réaction concernait les rendements simulés pour le tournesol. En effet, les résultats affichés apparaissaient nettement surestimés par rapport aux rendements observés localement, ce qui a immédiatement suscité une discussion, à la fois sur la méthodologie ayant conduit à ces projections et sur la manière dont les agriculteurs percevaient notre démarche de recherche :

« Je vous coupe : je suis agriculteur et les résultats que vous proposez sont impossibles, sans irrigation en plus, le rendement du tournesol qui a presque doublé alors que le rendement de maïs a baissé, c'est impossible. D'autant plus au vu des évolutions de températures que vous avez présenté. Attention à ne pas retomber dans l'anti-maïs » (agriculteur 1)

Cet écart a mis en lumière deux éléments. D'une part, un problème technique de paramétrisation du modèle, qui a ensuite été corrigé dans des simulations ultérieures. D'autre part, une forme de méfiance exprimée vis-à-vis de la modélisation elle-même, certains agriculteurs percevant notre approche comme porteuse d'une orientation idéologique, notamment en nous attribuant une position critique à l'égard du maïs au profit d'autres cultures. Cette interprétation a rappelé l'importance, dans ce type de démarche participative, de rendre explicite la neutralité des chercheurs et la transparence des choix méthodologiques, afin d'éviter toute suspicion de biais :

« Y'a ce qui pousse dans vos modèles et y'a ce qui pousse dans nos champs » (agriculteur 2)

Néanmoins, ces critiques ponctuelles n'ont pas remis en cause le déroulé de l'atelier dans la mesure où la majorité des résultats présentaient une cohérence avec ceux d'autres études sur l'agriculture et le climat. En ce sens, la dynamique collective a pu se maintenir et les agriculteurs présents ont continué à contribuer activement aux échanges. Cette séquence a ainsi mis en évidence que, si des réserves persistent vis-à-vis de certains résultats de modélisation, une partie des agriculteurs est déjà familiarisée avec les effets du changement climatique et participe régulièrement à d'autres projets de recherche ou de développement agricole où des résultats similaires sont discutés. Cela confirme que le partage de résultats chiffrés peut être un support de dialogue pertinent, à condition qu'il soit accompagné d'explications claires sur les méthodes, leurs limites et leur marge d'incertitude :

« Ça correspond à ce que j'ai pu voir sur d'autres projets, avec une impossibilité de s'appuyer sur les rendements de maïs fourrage et une baisse de rendement de la production en filière laitière » (agriculteur 3).

### *Réserves émises sur les images*

La question économique est revenue de manière récurrente et particulièrement forte lors des discussions. Elle est d'autant plus accentuée que la plupart des participants n'avaient pas pris part aux ateliers précédents. L'exercice prospectif semble avoir été mal compris par une partie d'entre eux, en particulier dans son rapport au fait qu'il permet de se projeter dans un monde futur régi par de nouvelles règles économiques, potentiellement différentes de celles qui structurent la réalité actuelle. Le discours principal de rejet des images est l'économie qui reste le cadre de référence absolu et conditionne les futurs choix possibles :

« C'est plus l'économie que la politique qui va faire qu'on se dirigera vers une image »  
(agriculteur 1)

Dans cette perspective, les propositions qui concernent la mise en place de nouvelles cultures dans les différentes images sont perçues avec prudence, toujours en lien avec la question économique. Le lien entre la consommation des ménages et les cultures agricoles est ainsi considéré comme le levier principal du système économique production-alimentation, en particulier par le panel des agriculteurs :

« Il faut faire attention aux produits à valeurs ajoutées aussi, ça dépend du marché, certains n'auront plus les moyens d'acheter » (agriculteur 5)

À cela s'ajoutent des réserves sur la manière dont les résultats ont été restitués. Plusieurs participants ont souligné la nécessité d'aller au-delà des seuls indicateurs de rendement et de l'ivivation, pour intégrer également des indicateurs économiques. Cela montre qu'il est nécessaire de développer davantage et d'expliquer les dimensions économiques, sociales et politiques des mondes environnants.

Enfin, la question de la main-d'œuvre a suscité de vives réactions, notamment face aux images **Agriculture duale de modèles spatialisés**, **Agriculture biologique technologique** et particulièrement pour l'image **Agriculture autonome agroécologique** qui supposent toutes une augmentation de la main-d'œuvre agricole dans des proportions différentes. D'abord, la capacité de transmission des exploitations est considérée comme un levier important en prospective, comme en témoigne cet agriculteur :

« L'évolution sera liée à la transmission de la main d'œuvre. Il n'y a pas beaucoup de jeunes issus des milieux agricoles qui souhaitent reprendre » (agriculteur 2)

L'image **Agriculture autonome agroécologique** a particulièrement interpellé les participants sur la question du retour à la terre et de la faisabilité concrète de systèmes nécessitant davantage de main-d'œuvre :

« Ok 2000 exploitations avec nos systèmes actuels j'ai du mal à l'imaginer mais si l'impact du changement nous oblige » (agriculteur 1)

Cette problématique est apparue d'autant plus cruciale qu'elle se pose de manière concomitante avec l'introduction de nouvelles technologies. Pour certains, l'automatisation et l'intelligence artificielle pourraient se substituer à la main-d'œuvre humaine, sans pour

autant remettre en cause la concentration des exploitations ou les conditions de travail. La question de la main-d'œuvre croise donc directement celle des conditions de travail et du renouvellement agricole. Elle peut illustrer plusieurs choses. D'une part, la difficulté pour les acteurs à s'approprier l'outil de la prospective pour envisager des mondes où l'organisation sociale et les structures de production diffèrent. D'autre part, cela peut aussi révéler des effets de cadrage liés à la manière dont les images ont été présentées aux participants qui peuvent générer des difficultés.

#### *Eléments identifiés comme des opportunités intéressantes*

Certains points ont également permis de faire émerger des accords entre les participants et les images proposées. Par exemple, la question de l'utilisation des nouvelles technologies apparaît, pour la majorité des participants, comme l'un des leviers les plus réalistes pour réduire, voire se passer, de l'usage des herbicides. Dans le même ordre d'idées, les travaux portant sur l'amélioration génétique des cultures, perçue comme un moyen d'adaptation aux effets du changement climatique, ont été globalement bien accueillis. Toutefois, cet intérêt pour l'innovation est fortement nuancé par la question des coûts et par la future raréfaction des matières premières. En effet, le développement technologique suppose des investissements élevés incluant l'acquisition et l'entretien des équipements, ce qui limite son attractivité. Ainsi, les participants semblent privilégier davantage les avancées génétiques que technologiques, jugées plus accessibles et moins dépendantes de soutiens financiers massifs, en particulier pour le développement de cultivars plus résistants au stress hydrique et thermique.

« Il y a la robotique, ok, mais dans quel contexte économique, c'est aussi beaucoup d'investissement et donc d'aides » (agriculteur 4)

Un autre sujet ayant suscité un consensus concerne la production non alimentaire, et plus particulièrement la production énergétique. Celle-ci est perçue comme une opportunité à la fois économique et environnementale qui permet de diversifier les débouchés en créant de nouvelles filières locales. Cela permet également d'articuler l'entretien paysager avec une logique de valorisation financière. Ce potentiel est souligné positivement par l'ensemble des parties prenantes. Cependant, cette orientation vers l'énergie pose inévitablement la question de la souveraineté alimentaire, soulevée par un agriculteur qui rappelle la nécessité de hiérarchiser les usages en contexte de baisse de rendement :

« Sauf qu'avec les baisses de rendement si on passe à l'énergétique, il faut faire des choix stratégiques » (agriculteur 5)

Enfin, la question des changements de pratiques agricoles, et notamment l'évolution des itinéraires techniques (dates de semis, modes de culture, organisation des travaux agricoles), a ouvert des discussions particulièrement stimulantes. Ces échanges montrent qu'une partie des agriculteurs se dit prête à envisager des transformations importantes de ses pratiques :

« Peut-être que l'on commencera à semer des maïs en hiver si les périodes de gels diminuent par exemple » (agriculteur 2)

### *Posture des institutions porteuses du CTEC*

Comme pour le deuxième atelier du panel animateur mixte, la parole agricole est restée dominante par rapport à la parole environnementale dans les débats. Toutefois, les représentants des institutions porteuses du CTEC (SDEA et AERM) ont clairement affirmé une parole environnementale. Ainsi, lors des discussions sur la réception des différentes images, l'Agence de l'eau a exprimé une position nette vis-à-vis de l'image **Agriculture de firme**, rapidement identifiée comme scénario tendanciel par les participants :

« La meilleure résilience des terrains, c'est aussi le taux de matière organique dans les sols, pas sûr que ce soit le cas avec le scénario 1 » (Agence de l'eau)

Les représentants institutionnels ont également joué un rôle de modération dans les échanges, en cherchant à tempérer certaines notions comme par exemple le recours à la technologie. Leur positionnement a été marqué par une instance sur les limites de l'approche technologique et sur la nécessité de recourir à des solutions alternatives :

« On va aussi atteindre les limites du système technologique, la technologie peut apporter des solutions, mais ça ne pourra pas tout faire. Il faut des solutions qu'on dit basées sur la nature » (Agence de l'eau)

Ces interventions ont contribué à rééquilibrer les discussions, en introduisant un cadrage plus institutionnel et en élargissant la réflexion au-delà des contraintes économiques exprimées par les agriculteurs. Elles traduisent également une volonté d'ancrer les débats dans la continuité des orientations portées par l'Agence de l'eau, en particulier dans le cadre du CTEC.

A l'issu de ces discussions, les participants se sont mis d'accord sur la plausibilité et la désirabilité des images **Agriculture biologique et technologique** et **Agriculture duale de modèles spatialisés**. L'image **Agriculture de firme** a été mise de côté après avoir été identifiée comme tendancielle. Enfin, l'image **Agriculture autonome agroécologie** a été discréditée par rapport à la question de la main d'œuvre qui reste peu plausible du point de vue des participants.

## 2.2 Les propositions à court terme des participants

Le troisième temps de l'atelier était consacré à la formulation de mesures à court terme qui permettent de mettre en place les changements jugés nécessaires pour tendre vers les images proposées.

### Vers l'image **Agriculture duale de modèles spatialisés**

Les propositions formulées s'inscrivent principalement dans une logique de diversification des filières et de reterritorialisation de l'alimentation. Elles reposent sur cinq axes :

- Faciliter le code des marchés publics pour la restauration collective, en introduisant deux évolutions : la non-mise en concurrence lorsqu'un produit local et sain existe, et la reconnaissance du critère « local » comme critère à part entière, afin de structurer une filière maraîchage territoriale.

- Financer la communication pour favoriser l'acceptabilité sociale de la proximité des activités agricoles.
- Aménager et diversifier les paysages agricoles, en particulier les espaces qui doivent être protégés (ripisylve, parcelles de fortes lixiviations...) par la division des champs et la réimplantation d'un réseau de haie, typique des paysages bocagers, via une concertation entre les agriculteurs et les animateurs de terrain, sans amener à une subdivision foncière (i.e. n'entraîne pas de visibilité dans la taille des exploitations existantes).
- Développer des filières pour les nouvelles cultures d'hiver et la luzerne pour répondre aux enjeux environnementaux.
- Soutenir la diversification des petites exploitations (< 10 ha) en finançant des outils de transformation et en valorisant les synergies avec le tourisme rural (logements, circuits courts).

### **Vers l'image Agriculture biologique et technologique**

Les propositions issues des discussions traduisent une inflexion vers un modèle plus hybride qui intègre des logiques de systèmes plus écologiques et qui tente de conserver le modèle de ferme familiale. Les objectifs étaient de construire des systèmes autoportants, dotés de filières fonctionnelles, tout en réduisant la complexité d'accès au capital pour les nouvelles fermes. Les mesures retenues sont :

- Garantir l'accès au capital (bâtiments, matériel, terres) pour les nouveaux exploitants via des financements locaux et mettre en place des incitations à la diversification des productions pour les grandes exploitations (> 200 ha).
- Moduler la taille des parcelles en fonction des enjeux environnementaux (érosion, lixiviation). S'il existe des litiges sur le découpage des parcelles, donner la possibilité aux institutions de racheter le foncier en question.
- Elargir les bandes enherbées mais en y intégrant des cultures à faibles intrants, pour lesquelles de nouvelles filières doivent être développées.
- Soutenir la robotique sur les cultures à forte valeur ajoutée dans la continuité de l'agriculture de précision (binage sélectif pour remplacer les herbicides, traitements fongiques localisé si détection de maladie, etc.).
- Organiser des ateliers de sensibilisation et de diffusion de pratiques alternatives pour promouvoir l'abandon du labour.

### **Vers l'image Agriculture autonome agroécologique**

Les propositions convergent vers une logique de réorganisation des systèmes agricoles autour de la sobriété, de la coopération et de la relocalisation. Parmi elles :

- Financer des expérimentations dans certaines exploitations pour réduire la dépendance à la mécanisation, en mobilisant des financements pour rémunérer de la main-d'œuvre sur de petites parcelles. Ces expérimentations s'accompagneraient d'ateliers visant à développer les savoir-faire autour de la réduction des intrants de synthèse et de la mécanisation.
- Créer des filières agricoles énergétiques locales (par exemple pour les chaufferies biomasse).
- Produire des partenariats avec les producteurs locaux pour fournir la restauration collective en structurant des filières locales pour renforcer le lien producteur-consommateur.
- Mettre en place un volontariat agricole régional destiné à sensibiliser aux métiers agricoles et à répondre partiellement à la question de la main-d'œuvre.

En résumé, les propositions à court terme concernent principalement le développement de nouvelles filières locales, pensées comme plus écologiques et résilientes que celles actuellement en place. La question du renouvellement de la main-d'œuvre agricole traverse l'ensemble des groupes, mais avec des réponses contrastées : accès facilité au capital pour attirer de nouveaux entrants, recours accru à la main-d'œuvre salariée dans les systèmes agroécologiques, ou encore mobilisation des jeunes via des dispositifs d'engagement. Enfin, la plupart des mesures convergent vers une amélioration des pratiques agricoles, en particulier sur la gestion des sols (cultures d'hiver, bandes enherbées, fin du labour), ce qui témoigne d'une reconnaissance partagée de l'importance de ce levier.

### 3. Discussion et perspectives à l'échelle locale

#### 3.1 La réception des images

La réception des images et des résultats de simulation doit d'abord être discutée à la lumière de la discontinuité de la participation à l'ensemble des ateliers. Cette non-continuité est liée en partie à l'écart d'un an entre le deuxième et le troisième atelier et la disponibilité des agriculteurs fortement dépendante du contexte climatique, ce qui a engendré plusieurs difficultés. D'une part, elle a fragilisé la dynamique collective et la capacité du nouveau groupe de participants à s'imprégnier de la méthodologie et à comprendre sur quoi reposait la création des différentes images. Bien que plusieurs points aient été explicités, il n'était pas possible d'y consacrer un temps suffisant pour présenter la démarche dans son ensemble. Par exemple, les critères normatifs définis lors du deuxième atelier n'ont pas pu être rappelés en détail, ce qui a limité la profondeur des échanges. Ce constat rejoint d'autres expériences de prospective participative montrant que la continuité des acteurs est un facteur clé de robustesse du processus et de légitimation des résultats (*Durance & Godet, 2010*).

Un second point de difficulté a concerné la capacité de projection dans des futurs différents du présent. Envisager l'évolution des logiques de fonctionnement des systèmes économiques a été assez compliqué pour les participants. Ce phénomène est bien documenté et montre la difficulté des acteurs à considérer d'autres systèmes de référence (*van Vliet et al., 2012*). Dans le cadre de la prospective, cette difficulté à se projeter dans l'inconnu renforce la nécessité de développer des mises en récit cohérentes et crédibles des scénarios produits (*Kosow, 2015* ; *Kok et al., 2011* ; *Pereira et al., 2019*), en particulier concernant la viabilité des mondes environnants et leur adéquation avec le monde technique agronomique représenté. Ce constat met en évidence l'importance d'une méthodologie de présentation de ces récits dans un temps limité, d'autant plus qu'un des résultats de l'atelier pointe le fait que les descriptions des récits sociaux-économiques et politiques données, via une présentation orale accompagnée d'un support à l'écran, pendant l'atelier n'ont pas permis de surmonter la difficulté de se projeter.

L'un des points majeurs soulevés par les participants est la place centrale de l'économie dans la crédibilisation des images, et en particulier le manque de compatibilité avec les conditions socio-économiques actuelles (*Robinson et al., 2011* ; *Gaitán-Cremaschi et al., 2019*), notamment pour les images **Agriculture biologique et technologique** et **Agriculture autonome agroécologique**. L'autre facteur qui semble être perçu comme un levier au changement est l'évolution de la main d'œuvre agricole. La disponibilité, la qualification et les

conditions de travail sont en effet des paramètres structurants des trajectoires agricoles, encore trop peu intégrés dans les exercices de prospective (*Caron et al., 2014* ; *Gaitán-Cremaschi et al., 2019* ; *Poux & Aubert, 2018*), alors qu'ils conditionnent leur réalisme social. Cette observation renvoie aux objectifs initiaux du projet, qui envisageait l'élaboration d'indicateurs pour chaque critère normatif, y compris ceux liés à la viabilité économique et à la désirabilité du travail. En raison d'un manque de temps, il n'a pas été possible de développer un indicateur sur le temps de travail. L'indicateur de rendement des cultures devait servir à la fois de proxy pour la résilience du système et pour sa viabilité économique, en particulier car il est inintelligible de trouver un indicateur économique qui se basent sur la marge brute dans un contexte de prospective où les charges opérationnelles directes sont inconnues (*Pham & Smith, 2014*). Toutefois, cet indicateur n'a pas été explicitement présenté en tant que double proxy lors de l'atelier, ce qui a empêché de le valoriser dans ces deux dimensions. Ce manque s'est reflété dans les réactions des participants et semble fragiliser l'ancrage territorial des trajectoires agricoles et leur crédibilité auprès des acteurs locaux (*Caron et al., 2014*).

Malgré ces limites, qui sont également liées à la durée de l'atelier, la majorité des participants a adhéré à l'exercice. Les ordres de grandeur présentés ont été jugés crédibles (sauf pour le tournesol, ce qui a permis une correction pour les résultats finaux présentés dans le chapitre 5), et parfois confortés par d'autres expériences de partage de connaissances et de prospective sur les dynamiques agricoles et climatiques à long terme. Les participants se sont aussi impliqués dans la formulation de mesures à court terme. Par ailleurs, un consensus s'est rapidement dégagé autour de la disqualification de l'image **Agriculture de firme**, dont les résultats, notamment en matière de rendements et surtout de pollution à long terme, ont été jugés insuffisants pour répondre aux critères normatifs et aux attentes d'un système agricole futur.

La réception des images par les participants a donc montré que les futurs proposés se sont heurtés aux réalités socio-économiques locales, notamment lorsqu'il s'agissait d'évaluer leur faisabilité dans le contexte actuel. Néanmoins, les discussions sur les conditions de mise en œuvre et les leviers institutionnels à l'échelle locale ont permis d'ancrer ces images davantage dans le réel. L'objectif principal de la présentation des images était de stimuler l'imagination des participants et de proposer des alternatives au scénario tendanciel. Or, les discussions liées à la réception de ces images sont restées fortement cadrées par les problématiques actuelles, ce qui souligne le besoin d'intégrer les indicateurs sociaux et économiques dans la description des images pour renforcer la crédibilité de celles-ci et faciliter la projection des participants dans des mesures concrètes à court terme.

### 3.2 Le type de mesure proposé

Les mesures proposées par les participants combinent plusieurs types d'actions qui sont regroupées et catégorisées dans le Tableau 23, en présentant la faisabilité à l'échelle locale, ainsi que les avantages et limites de ces mesures basés sur la littérature et un point de vue global sur les systèmes. Faire remplir ce tableau directement par les participants aurait permis d'enrichir la discussion, mais le temps imparti à l'atelier n'a pas suffi.

Tableau 23. Catégorisation des mesures proposées par les participants et évaluation de celles-ci en fonction du contexte local.

Catégories de mesure	Propositions	Faisabilité locale	Avantages	Limites actuelles
Création de marché & de filières	Développement de filières locales (maraîchage, cultures d'hiver, biomasse, restauration collective)	Moyenne : dépend de l'implication des collectivités et de la demande publique (PAT)	Peut connecter la demande publique à l'offre locale et consolider la production localement ( <i>Lamine, 2017</i> )	Potentiels surcoûts logistiques et contraintes sanitaires qui nécessitent des dispositifs d'accompagnement adaptés
Adaptation du code de marché public	Reconnaissance du critère « local » et simplification de la mise en concurrence	Faible à moyenne : nécessite évolution du cadre juridique national/UE, mais certains leviers existent au niveau régional (ex. clauses sociales/environnementales)	Intérêt si appliqué largement, favorise la légitimité des filières locales	Forte contrainte réglementaire, risque de contentieux, dépend des arbitrages juridiques
Mesures foncières	Accès facilité au foncier, modulation des parcelles, rachat institutionnel (SAFER, collectivités)	Moyenne : des dispositifs existent localement, mais très coûteux et limités en surface	Sécurise l'installation de nouveaux entrants, contribue à préserver les terres agricoles	Concerne un nombre réduit de bénéficiaires, dépendance à des financements publics conséquents
Aides à la transition agroécologique	Financement de pratiques agro-environnementales (MAEC, expérimentations locales, ateliers)	Élevée : mobilisable via dispositifs régionaux et PAC	S'intègrent dans des pratiques déjà existantes ( <i>Dumont et al., 2016</i> )	Potentiel de transformation limité si non accompagné d'une remise en cause des logiques de production dominantes ( <i>Zakeossian et al., 2017</i> )
Aide à la diversification économique	Soutien à la transformation à la ferme, valorisation via tourisme rural	Moyenne : dépend du dynamisme local et des soutiens régionaux/touristiques	Sécurise les revenus des petites exploitations	Ne concerne qu'un groupe d'agriculteurs disposant déjà de ressources (capital social, temps, compétences de gestion particulières)

Ateliers de sensibilisation et incitations	Pratiques agroécologiques , sans labour...	Simple : organisation d'ateliers sans obligation d'y participer	Changements effectifs si suivi continu et si cela rassemble un collectif important	Impact limité et demande un accompagnement à long terme
--	--	---	--	---

Ce que l'on peut voir avec ces mesures c'est qu'il existe un ensemble de leviers actionnables localement qui permettent de construire une alternative au système dominant maintenu par de multiples verrous sociotechniques et économiques. En effet, les propositions issues de l'atelier mettent en avant des leviers tels que la restauration collective, la structuration de filières de proximité, ou encore l'expérimentation de nouvelles pratiques culturelles à l'échelle des exploitations. La territorialisation des filières est une des mesures qui revient systématiquement dans les propositions, ce qui montre à quel point il s'agit d'un levier structurel ([Duru et al., 2015](#)). Ces dynamiques locales créent des *niches*, qui sont des espaces où sont portées des expérimentations locales qui favorisent les innovations à plus grande échelle ([Geels, 2002](#)) et où il est possible de tester des alternatives moins dépendantes des logiques dominantes (engrais de synthèse, mécanisation lourde, marchés mondialisés). La littérature sur les systèmes alimentaires territorialisés montre d'ailleurs que l'ancre local facilite l'émergence de réseaux d'acteurs capables de soutenir ces innovations et d'augmenter leur légitimité ([Magrini et al., 2019](#)). Les participants ont également proposé des mesures ambitieuses en faveur d'une gestion agroécologique des paysages, notamment à travers des démarches de concertation foncière, bien que ces concertations soient reconnues comme complexes par les acteurs locaux. En effet, ces mesures portent des initiatives locales qui se heurtent rapidement à des contraintes structurelles plus larges, notamment celles liées à la PAC, aux accords commerciaux internationaux et aux filières agro-industrielles dominantes, qui continuent majoritairement d'orienter les pratiques agricoles ([Black et al., 2022](#)). Enfin, la question transversale de la main-d'œuvre illustre particulièrement bien les limites du cadre local face au verrouillage sociotechnique. Les propositions de volontariat agricole ou de financement de main-d'œuvre pour expérimenter de nouveaux systèmes rappellent des initiatives passées (comme les expériences de « volontourisme » rural). Or, ce type de mesure ne répond pas aux situations d'accaparement et de transformation des terres agricoles, de difficulté de rentabilité des petites et moyennes exploitations et de la crise du non renouvellement générationnel en agriculture qui entraîne la diminution de la population active agricole. Le maintien de la population agricole suppose une sécurisation des revenus et des conditions de travail attractives, ce qui dépasse sans doute ce qu'un dispositif local peut assurer seul.

Les mesures proposées par les participants témoignent d'une volonté concrète de s'adapter aux réalités du terrain pour entamer une transition agroécologique progressive des systèmes agroalimentaires. Cependant, leur portée reste contrainte par des limites structurelles comme la dépendance au cadre institutionnel plus large (PAC, marchés mondialisés) ou des difficultés de financement de certaines mesures. En effet, des études montrent que si les actions locales peuvent être des amorces dans la transition des systèmes, elles ne suffisent pas à lever l'ensemble des verrous sociotechniques qui structurent les systèmes agricoles dominants ([Geels, 2002](#)).

Dans le cadre de cet atelier, les mesures proposées présentent tout de même plusieurs limites. D'abord, les mesures s'inscrivent dans la continuité des dispositifs déjà existants (soutien aux circuits courts, adaptation du code des marchés publics, diversification des assolements, etc.) ou à l'adaptation de politiques publiques (subventions, régulation des marchés, soutien à l'investissement). Elles apparaissent davantage comme des verdissements ou des ajustements progressifs de pratique ([Lamine, 2011](#) ; [Dumont et al., 2016](#)), plutôt que comme des ruptures structurelles susceptibles de transformer en profondeur les systèmes agricoles. De plus, les propositions sont peu articulées, ce qui montre que la question d'une gouvernance locale n'est pas pensée en tant que telle. Par exemple, la création de filières ne relève pas d'une vision systémique du nexus eau–production–alimentation ([Bidoglio et al., 2019](#)), mais de réponses ponctuelles traitées de façon isolée. Le dernier point concerne l'absence de réflexion stratégique autour des tensions possibles qui peuvent être induites par la modification de certaines logiques, par exemple entre compétitivité à l'export et relocalisation alimentaire.

L'exercice a globalement bien fonctionné dans la mesure où il a permis de traduire des images à long terme en mesures concrètes, applicables à court terme qui permettent de poser des jalons pour infléchir la trajectoire du scénario tendanciel. Cette approche montre donc que la prospective peut être rendue opérationnelle ([Lumbroso et al., 2021](#) ; [Durance & Godet, 2010](#)). Les transformations envisagées ont été mises en lien avec des instruments de gestion à l'échelle locale. Néanmoins, il s'agit majoritairement d'instruments pré-existants, qui s'insèrent dans des cadres connus. Pour dépasser ce biais, il serait nécessaire de renforcer l'accompagnement méthodologique de l'atelier en s'appuyant par exemple sur des signaux faibles et des expériences menées ailleurs.

### 3.3 Hypothèses d'engagement des acteurs par la méthodologie

Cette partie vise à examiner si la méthodologie au regard de l'ensemble de ces résultats parvient à mobiliser les acteurs d'une part et d'autre part à aboutir à une efficacité environnementale. En effet, cette méthodologie a été conçue dans une perspective stratégique d'amélioration qualitative et quantitative des ressources en eau.

La mobilisation des acteurs a connu une discontinuité entre le deuxième et le dernier atelier. L'écart de temps important a réduit la dynamique collective et complique l'évaluation de la méthodologie. Malgré cela, toutes les parties prenantes invitées étaient présentes à chaque rencontre. Cela montre que ce type d'étude suscite de l'intérêt. La discontinuité semble donc surtout liée au temps long propre à la recherche et à l'usage de modèles.

L'efficacité environnementale repose d'abord sur un changement de cadrage des problématiques liées à l'eau, en particulier sa dimension qualitative. Déplacer le cadrage d'une gestion de l'eau, abordée depuis plus de vingt-cinq ans sans amélioration notable, vers un cadrage qui met en évidence les effets du changement climatique et la nécessité de changer de pratiques agricoles, permet finalement d'ouvrir une discussion environnementale. Un résultat marquant de l'atelier illustre ce basculement. Les participants, y compris les agriculteurs, ont unanimement décidé d'écartier l'image **Agriculture de firme**, interprétée pourtant comme scénario tendanciel. Ce choix se base en partie sur les résultats de modélisation qui appuient le constat partagé de sa non résilience à long terme mais aussi potentiellement de l'effet repoussoir de l'emprise des firmes pour des agriculteurs encore attachés à un modèle d'agriculture familiale. Cela a tout de même permis d'ouvrir un débat

sur la pertinence de poursuivre, ou non, cette tendance. Le fait de s'en détourner collectivement, puis de travailler sur des mesures concrètes à court terme pour l'éviter révèle une tentative de produire de nouvelles *prises sur le futur* (*Chateauraynaud, 2013* ; *Lumbroso et al., 2021*). En ce sens, l'exercice de prospective a permis de dépasser une approche strictement technique et d'engager les acteurs dans une dynamique d'action orientée vers des changements structurels (*Lumbroso, 2019*). Cette mise en mouvement est d'autant plus tangible que les discussions de ce dernier atelier ont nourri les premières étapes de la rédaction du CTEC, coordonné par l'AERM et le SDEA qui actent ce nouveau cadrage de la gestion de l'eau.

De plus, cette méthodologie permet de *faire atterrir* l'exercice de prospective de deux manières. La première consiste en une confrontation directe avec la réalité : elle met en lumière l'écart entre les récits prospectifs et leur existence concrète : « il y a ce qui pousse dans vos modèles, et il y a ce qui pousse dans nos champs ». Cet atterrissage aide aussi les participants à identifier les principaux facteurs qui entravent la possibilité d'existence de certaines des images présentées, comme l'évolution de la population active agricole ou la viabilité économique des exploitations. La deuxième confrontation porte sur les mesures proposées à l'échelle locale. Celles-ci s'inscrivent généralement dans ce que l'AERM peut financer et dans la continuité des dispositifs déjà existants. Or, c'est précisément cette étape qui mérite d'être retravaillée. En effet, rester dans ces cadres limite la capacité à imaginer de véritables ruptures, qui sont nécessaires pour tendre vers des images comme **Agriculture autonome agroécologique** ou **Agriculture biologique et technologique**, qui impliquent de profonds changements de paradigme. Or, cette idée, déjà développée de former un continuum entre le forum prospectif et le forum décisionnel (*Treyer, 2013*) n'est absolument pas évidente, car l'espace décisionnel reste attaché fortement à ses propres cadres, même si on propose un recadrage dans la manière d'aborder la gestion de l'eau. Il est possible de répondre à ce problème en favorisant davantage de débat lors des discussions sur le choix des mesures en introduisant des questions clés comme qui doit agir, qu'est-ce qu'implique une action significative, et quelles formes d'action doivent être privilégiées (*Mermel, 2018*).

## Conclusion

Ce dernier atelier en lien avec le CTEC a bien atteint ses objectifs de proposer des mesures à court terme qui s'ancrent dans les images proposées. Néanmoins, la difficile réception de la présentation des résultats et des images par les participants montre bien à quel point la continuité de la participation est essentielle pour l'appropriation de la méthode. Les participants ont aussi exprimé combien il est complexe de se projeter dans des futurs éloignés du présent, surtout quand les récits prospectifs ne prennent pas assez en compte des dimensions concrètes comme la viabilité économique des exploitations ou la disponibilité de la main-d'œuvre agricole. Malgré ces limites, l'exercice a pu aborder certaines questions intéressantes, comme le rejet de l'image tendancielle, ce qui a ouvert la voie à des discussions sur des alternatives jugées plus crédibles et plus désirables. Les mesures proposées à court terme montrent que les territoires peuvent être des leviers pour enclencher des transitions et expérimenter de nouvelles pratiques. Mais elles rappellent aussi que ces dynamiques ne peuvent pas, à elles seules, dépasser les contraintes plus larges liées aux politiques agricoles, aux marchés mondialisés ou au renouvellement de la population agricole.

En somme, la prospective permet de créer un espace propice à l'ouverture du dialogue, à l'enrichissement de la pensée collective et au rapprochement entre les perspectives à long terme et les actions concrètes. Elle doit néanmoins encore être accompagnée davantage pour donner la possibilité aux participants et aux institutions de proposer des mesures qui s'inscrivent dans des gouvernances qui promeuvent l'écologisation via des changements structurels (*Lamine, 2011*).

## Références

- Bidoglio, G., Vanham, D., Bouraoui, F., & Barchiesi, S. (2019). The water-energy-food-ecosystems (WEFE) nexus. *Encyclopedia of ecology*, 4, 459-466.
- Black, J., Courtney, P., Maye, D., Urquhart, J., Vigani, M., Paas, W., ... & Reidsma, P. (2022). Constrained sustainability and resilience of agricultural practices from multiple lock-in factors and possible pathways to tackle them.
- Caron, P., Biénabe, E., & Hainzelin, E. (2014). Making transition towards ecological intensification of agriculture a reality: the gaps in and the role of scientific knowledge. *Current opinion in environmental sustainability*, 8, 44-52.
- Chateauraynaud, F. (2011). Argumenter dans un champ de forces. *Essai de balistique sociologique*.
- Dumont, A. M., Vanloqueren, G., Stassart, P. M., & Baret, P. V. (2016). Clarifying the socioeconomic dimensions of agroecology: Between principles and practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(1), 24–47
- Durance, P., & Godet, M. (2010). Scenario building: Uses and abuses. *Technological forecasting and social change*, 77(9), 1488-1492.
- Duru, M., Therond, O., & Fares, M. H. (2015). Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy for sustainable development*, 35(4), 0.4
- Gaitán-Cremaschi, D., Klerkx, L., Duncan, J., Trienekens, J. H., Huenchuleo, C., Dogliotti, S. & Rossing, W. A. (2019). Characterizing diversity of food systems in view of sustainability transitions. A review. *Agronomy for sustainable development*, 39(1), 1.
- Kok, K., van Vliet, M., Bärlund, I., Dubel, A., & Sendzimir, J. (2011). Combining participative backcasting and exploratory scenario development: experiences from the SCENES project. *Technological forecasting and social change*, 78(5), 835-851.
- Kosow, H. (2015). New outlooks in traceability and consistency of integrated scenarios. *European Journal of Futures Research*, 3, 1-12.
- Lamine, C. (2011). Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *Journal of rural studies*, 27(2), 209-219.
- Lamine, C., Maréchal, G., & Darolt, M. (2017, November). Ecological transitions within agri-food systems: a Franco-Brazilian comparison. In 8th AESOP-Sustainable Food Planning Conference.
- Lumbroso, S. (2019). Prospective et stratégies pour l'environnement: entre fabrique des futurs et situation de gestion, quelles prises pour l'action? (Doctoral dissertation, Université Paris Saclay (COmUE)).
- Lumbroso, S., Coreau, A., Narcy, J.B. & Poux, X. (2021) Fabriquer des situations de gestion futures pour favoriser des enjeux environnementaux : quel intérêt stratégique de démarches prospectives pour des acteurs d'environnement ?. Dans *L'environnement en mal de gestion* (p. 203-216). Presses universitaires du Septentrion.
- Magrini, M. B., Martin, G., Magne, M. A., Duru, M., Couix, N., Hazard, L., & Plumecocq, G. (2019). Agroecological transition from farms to territorialised agri-food systems: issues and drivers. In *Agroecological transitions: From theory to practice in local participatory design* (pp. 69-98). Cham: Springer International Publishing.
- Mermet, L. (2020). Knowledge that is actionable by whom? Underlying models of organized action for conservation. *Environmental Science & Policy*, 113, 39-46.
- Pereira, L., Sitas, N., Ravera, F., Jimenez-Aceituno, A., & Merrie, A. (2019). Building capacities for transformative change towards sustainability: imagination in intergovernmental science-policy scenario processes. *Elem Sci Anth*, 7, 35.
- Pham, L. V., & Smith, C. (2014). Drivers of agricultural sustainability in developing countries: A review. *Environment Systems and Decisions*, 34(2), 326-341.

Robinson, J., Burch, S., Talwar, S., O'Shea, M., & Walsh, M. (2011). Envisioning sustainability: Recent progress in the use of participatory backcasting approaches for sustainability research. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(5), 756-768.

Treyer, S. (2009). Changing perspectives on foresight and strategy: from foresight project management to the management of change in collective strategic elaboration processes. *Technology Analysis & Strategic Management*, 21(3), 353-362.

Zakeossian, D., Poux, X., Ménard, M., Billy, C., Guichard, L., Steyaert, P., & Gascuel, C. (2017). Protéger les captages d'eau potable contre les pollutions diffuses agricoles : quelles connaissances pour (re) penser un cadre d'action publique efficace?. *Innovations Agronomiques*, 57, 7-19.

## Conclusion générale

Cette thèse avait pour objectif de proposer une méthode innovante et transposable d'engagement au changement de pratiques agricoles dans le but de réduire durablement la pression exercée sur la quantité et la qualité des ressources en eau. De nombreux travaux ont déjà mis en évidence les limites des instruments réglementaires ou incitatifs développés par l'action publique pour promouvoir des changements de pratiques agricoles. Le pari de cette recherche était de mobiliser des quantifications et des simulations ainsi que les représentations ou perceptions du changement climatique et de ses effets à moyen et long termes sur l'agriculture et l'eau, en tant que prise possible pour dessiner des trajectoires de transitions des agro-hydrosystèmes. Le bassin de la Souffel, sur lequel la méthode a été conçue et déployée, se prêtait particulièrement bien à la démarche compte tenu de l'ancienneté et des effets limités des mesures prises jusqu'à présent pour y contenir les concentrations en nitrates et pesticides. La conclusion générale revient d'abord sur les questions de recherche et les principaux résultats obtenus. Elle propose ensuite un retour réflexif sur le déroulement et l'aboutissement de cette thèse. Enfin, elle ouvre sur les perspectives offertes par ce travail.

### 1. Principaux résultats

Cette partie revient dans un premier temps sur les conclusions associées aux différents partis pris méthodologiques, afin de répondre aux questions de recherche initialement posées. Dans un second temps, elle discute la place et les apports de l'interdisciplinarité dans ce travail de thèse et en particulier en sciences de la durabilité. Enfin, elle revient sur la question de la généralité de la méthode proposée.

#### 1.1 Synthèse des éléments de réponses aux questions de recherche basées sur les partis pris

##### *Aborder la préservation de la ressource en eau via le prisme du changement climatique*

La question du changement climatique constitue déjà un sujet de mobilisation sur le territoire, en particulier pour la profession agricole dont les pratiques ont commencé à évoluer face aux effets perçus de ce phénomène (cf. [chapitre 3](#)). Ces évolutions restent toutefois individuelles et peu concertées. Le premier atelier de diagnostic partagé a mis en évidence un consensus fort autour de la réalité des effets climatiques, des risques qui en découlent et de la nécessité d'adapter les pratiques. Il a aussi permis de confronter les expérimentations de chacun, qu'il s'agisse des agriculteurs, des conseillers ou des gestionnaires, et de mettre en discussion leurs démarches respectives face aux bouleversements climatiques. Le changement climatique s'affirme ainsi comme un levier pertinent pour engager le dialogue sur les transformations agricoles à opérer localement. Présenter des données sur l'évolution de la quantité et de la qualité de l'eau a aussi été la première occasion de lier, sur le territoire, les relations entre changement climatique et gestion de l'eau.

L'hypothèse de gestion intégrée des risques agro-hydroclimatiques repose sur l'idée que l'adaptation contrainte des pratiques agricoles face au forçage climatique doit s'accompagner

d'une gestion environnementale. Cette approche permet de dépasser l'objectif unique d'amélioration de la qualité physico-chimique de la Souffel, en le réintégrant dans une stratégie axée sur la résilience des pratiques agricoles à long terme. Dès la conception des images, cette perspective a guidé le travail, avec comme critères normatifs la résilience des agro-hydrosystèmes et une réduction significative de la pollution par rapport à l'état actuel de la Souffel. Le choix d'utiliser des critères normatifs visait à guider les discussions et à poser les bases d'une réflexion à long terme sur un futur inscrit dans une gestion environnementale. Il s'agissait aussi d'examiner les conditions permettant l'émergence d'agro-hydrosystèmes plus résilients et d'une Souffel moins polluée.

En plus des données actuellement mesurées sur la Souffel concernant les concentrations en pesticides et en nitrates, qui sont encore très élevés, les résultats de modélisation montrent que le système actuel est moyennement viable à long terme, avec une perte de rendement d'environ 20 % et une grande variabilité des rendements, et qu'il ne respecte pas l'objectif de réduction de la pollution. L'élaboration de ces images a révélé la difficulté à se projeter dans des systèmes agricoles très différents de ceux connus aujourd'hui, en particulier pour le panel des agriculteurs. De manière générale, les visions fondées sur l'enjeu environnemental sont restées marginales, bien que certaines images co-construites proposent des changements radicaux (suppression des engrains de synthèse, abandon des pesticides, etc.). Les simulations agro-hydrologiques confirment que la gestion intégrée des risques hydroclimatiques reste complexe : elle implique souvent une baisse des rendements, parfois plus marquée que celle induite par le seul changement climatique. En effet, la réduction drastique de la lixiviation azotée, qui est utilisée ici comme indicateur de pollution, ne peut reposer que sur une modification structurelle des pratiques et non sur une simple adaptation aux effets du changement climatique comme le montrent les résultats du scénario tendanciel. Cela souligne la nécessité de mettre en avant d'autres indicateurs que le rendement et d'autres changements de pratiques que la modification d'assoulement si l'on souhaite définir des stratégies agricoles résilientes et intégrer résolument la question de la désirabilité pour les différents acteurs mobilisés.

La prospective doit ainsi contribuer à concevoir des mondes englobants, où l'économie ne repose pas uniquement sur la logique de rentabilité, mais sur d'autres formes de valeurs. Cette réflexion devient d'autant plus nécessaire que, dans un futur marqué par des événements climatiques plus intenses et plus fréquents, la variabilité des rendements, même atténuée dans les systèmes diversifiés, restera particulièrement élevée. Cette approche permet d'éviter de retomber dans des logiques court-termistes ou strictement productivistes, et ouvre la voie à une gestion véritablement intégrée des risques climatiques.

### *Travailler sur et avec un territoire*

Ce travail a consacré une attention significative à l'étude des spécificités territoriales (cf. [chapitre 2](#)). Elle a permis d'identifier différents groupes d'intérêts et de repérer les personnes pertinentes à inviter aux ateliers, mais également de nourrir les discussions avec des éléments concrets et situés. Ce travail a par exemple permis de dresser une liste des principales limites auxquelles fait face l'agro-hydrosystème de la Souffel sur le territoire du Kochersberg : une augmentation importante du stress hydrique ces dernières années conjuguée à la difficulté de développer des réseaux d'irrigation ; une très forte productivité historique aujourd'hui

fragilisée par ce stress hydrique; des rivières de petite taille et à faible débit très sensibles aux pressions agricoles et urbaines ; enfin, un contexte d'agriculture conventionnelle qui contribue à des concentrations très élevées en nitrates et en pesticides, faisant de cette rivière l'une des plus polluées d'Europe, malgré des tentatives de réduction des pollutions engagées depuis la fin des années 1990 et dont les résultats restent très limités. Ces analyses ont ainsi permis d'adapter la méthodologie aux conditions particulières de ce territoire et sont indispensables pour fournir les données d'entrée aux modèles agro-hydrologiques.

Le dispositif participatif a été une dimension essentielle du travail à l'échelle locale. L'alternative aurait été de concevoir un projet élaboré en chambre ou dans un autre contexte, en tenant peu compte des problématiques de terrain et des questions d'acceptabilité du changement par les acteurs locaux. Ce projet a donc fait le choix d'équiper des initiatives d'accompagnement au changement de pratiques susceptibles d'être déployées par des acteurs d'environnements dans divers territoires. Ce choix a impliqué un travail de caractérisation de l'agro-hydrosystème, comme décrit précédemment, ainsi que la production d'un diagnostic partagé sur la question climatique. Celui-ci a permis de rendre visibles les vécus des participants face au changement climatique, leurs contraintes liées à l'évolution des pratiques, et de les amener à s'interroger sur une vision désirable du futur système Souffel. L'aspect participatif a aussi renforcé l'importance de la transparence et de la fidélité aux propos recueillis, ce qui a influencé la manière de construire la démarche. Par exemple, le besoin d'explicitation des choix méthodologiques a conduit à concevoir une méthodologie de passage des dires d'acteurs à la construction des récits (cf. [chapitre 4](#)). Si le dispositif participatif conduit à tester et documenter les résultats que peuvent produire des procédures attachées à la transparence, il vise aussi à faciliter la transposabilité de la méthode. Dans cette perspective, il apparaît nécessaire de l'outiller pour qu'elle puisse s'adapter à différentes spécificités territoriales ainsi qu'à des contextes financiers, sociaux et institutionnels variés.

Le dernier point concerne le choix d'un cadre local, pensé comme un moyen possible de contourner le verrouillage socio-technique du système agro-environnemental. Sur ce point, et sur la base de l'expérience menée sur la Souffel, il est difficile d'affirmer que ce type d'exercice permette de dépasser entièrement ce verrouillage. En revanche, l'échelle locale a le mérite d'ancrer les discussions dans le concret, notamment en articulant le dernier atelier avec le contrat territorial sur la Souffel financé par l'AERM (2020-2023 puis 2025-2028), ce qui a ouvert la possibilité d'expérimenter quelques pistes finançables à cette échelle territoriale et d'adapter certaines pratiques aux effets du changement climatique (cf. [chapitre 6](#)). Il ne s'agit pas, pour autant, de véritables leviers d'atténuation du changement climatique, ni de transformations structurelles du système agricole, qui restent largement déterminées par le poids des politiques agricoles nationales et européennes, les dynamiques d'un marché globalisé ou encore la dépendance logistique et technologique des exploitations. En revanche, ces pistes constituent des soutiens ciblés, permettant à certains types d'exploitations d'envisager des ajustements : introduire des cultures plus résilientes grâce à des financements spécifiques et des filières associées, réimplanter des bocages en développant des filières locales de valorisation énergétique des sous-produits de leur entretien, généraliser certaines pratiques comme le non-labour, ou encore expérimenter de nouveaux modèles d'acquisition foncière afin de limiter l'érosion du nombre d'exploitations et de la population agricole.

### *Le choix d'une démarche frugale*

Le choix d'une démarche frugale s'explique avant tout par la volonté de produire une connaissance à la fois globale, systémique et interdisciplinaire, tout en tenant compte des contraintes temporelles inhérentes à un travail doctoral. Ainsi, la frugalité apparaît comme un compromis nécessaire entre l'ambition d'explorer la complexité des systèmes étudiés et la faisabilité concrète du projet dans le cadre temporel limité d'une thèse et en perspective d'une reproductibilité de la démarche. L'application pratique de la frugalité dans ce travail repose sur deux temps. Le premier est une frugalité choisie, décidée dès les prémisses du projet. Elle s'est traduite par la mobilisation d'une pluralité de concepts, d'approches méthodologiques et de courants de pensée, ainsi que par le recours à des outils préexistants. Le second est une frugalité constrainte, conscientisée et mise en place au contact du terrain. En effet, il est rapidement apparu que le temps disponible des parties prenantes, et en particulier des agriculteurs, constituait une ressource rare. Poursuivre une démarche participative impliquait donc de limiter la durée et le nombre d'ateliers, afin d'assurer la mobilisation et la présence effective des différentes parties prenantes.

Néanmoins, dans un contexte de recherche doctorale, il est apparu difficile de concevoir un travail strictement frugal, et ce pour plusieurs raisons :

(i) La première tient à l'absence de références méthodologiques comparables : il est difficile de savoir où placer le curseur du détail nécessaire, que ce soit pour le niveau de connaissance du territoire (cf. [chapitre 2](#)), pour connaître les relations entre les différentes variables d'un système nécessaires à la cohérence des futurs (cf. [chapitre 4, section 2.4](#)), ou encore pour le degré de précision requis dans le paramétrage des données d'entrée (cf. [chapitre 5](#)). En effet, certains éléments de base restent incontournables, mais d'autres, plus contextuels, permettent d'affiner la compréhension des spécificités locales et d'enrichir les échanges avec les acteurs. Certaines informations peuvent s'avérer cruciales pour ouvrir des discussions nouvelles ou servir de leviers de changement lors des ateliers, comme par exemple les questions de la variabilité des filières avec la potentielle fermeture de la sucrerie d'Erstein qui capte toutes les productions de betterave sucrière sur le territoire. Enfin, il faut rappeler que ce travail constitue une première mise en œuvre de cette méthodologie. Une fois formalisée et nourrie de ce retour d'expérience, il devient plus aisément de sélectionner, selon les territoires, les volets les plus pertinents à approfondir : diagnostic agraire, dynamiques d'irrigation, ou encore relations entre riverains et agriculteurs.

(ii) La réduction du temps consacré aux ateliers, et plus largement la faible disponibilité des acteurs, a induit un travail supplémentaire important. Cette capacité de mobilisation modérée des acteurs a conduit à concevoir et à déployer une méthodologie transparente, cohérente et robuste, permettant de transformer les verbatims et productions graphiques des acteurs en récits, puis en données d'entrée (cf. [chapitre 4](#)). Cette démarche, chronophage, visait à reconstituer des futurs plausibles à partir de contributions fragmentaires, tout en explicitant les choix opérés et les combinaisons de variables retenues.

Une approche alternative aurait consisté à réduire le poids des dires d'acteurs en s'appuyant sur des modèles de futurs déjà présents dans la littérature et les imaginaires collectifs ([Cairns et al., 2016](#)). Cela aurait permis de limiter le temps nécessaire à la production des futurs, en cadrant davantage les données d'entrée (types de cultures, itinéraires techniques,

fertilisation, structure paysagère, etc.), ce qui en aurait fait un exercice plus technique et moins délibératif.

(iii) Le recours à deux modèles agro-hydrologiques préexistants a mobilisé en fait un temps considérable (cf. [chapitre 5](#)). Ce choix se justifiait par la nécessité d'obtenir des ordres de grandeur cohérents intégrant à la fois pratiques agronomiques et forçage climatique, comme le permettent les modèles de type IAM, et ainsi discriminer et potentiellement hiérarchiser les récits selon les critères normatifs retenus. Toutefois, d'autres modèles, ou le recours à des dires d'experts auraient pu s'avérer plus adaptés dans ce contexte, en fonction des objectifs de précision et des contraintes de temps, qui seront explicités plus loin.

## 1.2 Retours sur l'expérience d'une démarche interdisciplinaire en sciences de la durabilité

Ce projet de thèse a été conçu dès l'origine comme un espace de rencontre entre plusieurs disciplines, en particulier la prospective et la modélisation, appuyées par un dispositif participatif, ce qui est une combinaison déjà relativement courante ([Delmotte et al., 2017](#); [Ganivet, 2023](#)). Toutefois, l'ambition ici a été d'aller plus loin en s'engageant dans une véritable démarche interdisciplinaire, en articulant directement au moins trois approches principales : la prospective, la modélisation et l'agronomie. À celles-ci se sont ajoutées des méthodes issues d'autres disciplines telles que la géographie sociale, la sociologie environnementale, l'analyse d'archives historiques ou encore celle de données climatiques. Cette hybridation méthodologique visait à développer une approche intégrée, à la fois territorialisée et systémique, afin d'accompagner les changements de pratiques agricoles sur d'autres territoires à enjeux. L'interdisciplinarité a constitué une des clés de la mobilisation locale : elle a permis d'ouvrir et de nourrir les discussions entre parties prenantes dans un contexte tendu, marqué par des relations souvent conflictuelles entre acteurs agricoles et environnementaux. Au-delà de la construction d'espaces de dialogue entre les différentes parties prenantes, cette approche interdisciplinaire a également contribué à élargir les discussions vers une intégration explicite des enjeux environnementaux, notamment à travers la formulation de critères normatifs et d'injonctions visant à mieux protéger les écosystèmes, en particulier lorsqu'ils sont affectés par les agrosystèmes et les changements climatiques.

Ce projet s'inscrit pleinement dans le champ des sciences de la durabilité, dont l'ambition initiale est de produire une science véritablement interdisciplinaire ([Sloep, 1994](#)). Néanmoins, sa mise en œuvre effective demeure complexe, dans la mesure où les logiques disciplinaires restent fortes et où les différences entre disciplines (e.g. vocabulaire, méthodes, théories, cadres conceptuels ou encore épistémologies, c'est-à-dire des manières de poser les problématiques de recherche) persistent. Ce travail a donc cherché à dépasser ces cloisonnements en intégrant différents cadres conceptuels et en mobilisant les apports de chaque discipline pour répondre à une problématique commune : accompagner le changement de pratiques agricoles vers une gestion plus respectueuse de l'environnement. Pour ce faire, un effort particulier a été porté sur l'acquisition et l'assimilation d'une diversité de concepts et de méthodes propres à chacune des disciplines, qui ont ensuite été adaptés, mis en dialogue et articulés dans une perspective systémique. On peut prendre l'exemple du terme *scénario*, que nous avons choisi de transformer en *image* afin qu'il soit intelligible et mobilisable dans chacune des disciplines concernées. En prospective, le scénario renvoie à une double dimension synchronique et diachronique, tandis qu'en modélisation il a une

signification plus technique et restreinte. Le choix du mot *image* a ainsi permis de créer un terrain commun, qui ne concerne que la dimension synchronique, en conservant la richesse conceptuelle et méthodologique de chaque discipline, tout en rendant le terme opératoire dans le cadre interdisciplinaire du projet.

### 1.3 Conclusions sur la générnicité de cette méthode

Cette recherche visait à produire une méthode transposable. À l'issue de cette thèse, cette question reste problématique. Dans ce manuscrit, j'ai cherché à retracer les étapes méthodologiques principales et saillantes susceptibles de permettre une transposition de cette démarche sur d'autres territoires, tout en veillant à garantir la transparence et la cohérence du processus. Néanmoins, la transposabilité de la méthode se heurte à plusieurs limites structurelles et pratiques, parmi lesquelles :

- (i) La disponibilité et l'accessibilité des études locales : celles-ci sont souvent produites par des institutions locales (chambres d'agriculture, agences de l'eau, bureaux d'études, observatoires environnementaux) et concernent des thématiques diverses (e.g. pratiques agronomiques, systèmes de culture, paramètres pédologiques, données climatiques, etc.). Si ces études viennent à manquer, la connaissance des spécificités territoriales et des données nécessaires à la configuration des données d'entrée peut se révéler être une étape complexe.
- (ii) Un appui pour la participation : la réussite des ateliers participatifs repose largement sur la qualité de l'animation ainsi que sur la possibilité de mobiliser un relais local disposant d'une légitimité auprès des acteurs agricoles et institutionnels. Ces appuis sont indispensables pour assurer la participation et favoriser le dialogue, en particulier dans des contextes où les relations entre parties prenantes agricoles et environnementales sont parfois conflictuelles.
- (iii) L'usage des modèles agro-hydrologiques : l'utilisation de ces modèles requiert des compétences techniques en modélisation et en traitement de données, ainsi qu'un temps de travail conséquent. Ces modèles représentent donc un verrou important en termes de transférabilité. Leur utilisation peut être impossible quand les moyens humains et financiers sont limités, ce qui est souvent le cas. Leur utilisation peut néanmoins être déléguée si nécessaire à des prestataires spécialisés<sup>13</sup> si les moyens financiers le permettent.

Si ces conditions ne sont pas toujours réunies, la méthodologie pourrait être envisagée non pas comme une reproduction à l'identique, mais plutôt comme une adaptation graduée, tenant compte des ressources disponibles et des spécificités territoriales.

## 2. Ressentis personnels sur cette thèse et son aboutissement

Je me suis engagée dans cette thèse pour répondre à des questionnements à la fois personnels et scientifiques, en particulier sur la manière dont il est possible de transformer les systèmes agricoles et d'intégrer les changements qui en découlent dans nos sociétés. L'entrée par l'agriculture m'a semblé, et me semble toujours, pertinente car la transformation des

<sup>13</sup> Structures comme MAELAB (bureau d'étude spécialisé dans l'utilisation et le développement de MAELIA) ou des bureaux d'étude comme ETWA pour la mobilisation de SWAT+ (<https://www.hetwa.fr>).

systèmes agricoles constitue un levier central pour engager les grandes transitions sociétales nécessaires à la lutte contre le changement climatique. Modifier les pratiques agricoles soulève une pluralité d'enjeux allant de la gestion des écosystèmes (sols, eau, biodiversité, etc.) et des émissions de gaz à effet de serre jusqu'aux modes de vie humains, qu'il s'agisse des régimes alimentaires, de l'organisation des territoires ou encore de la structuration de la population active.

Néanmoins, ces années de thèse et les différents travaux qui les ont accompagnées se sont révélés parfois particulièrement éprouvants, me plongeant à plusieurs reprises dans un profond désarroi, voire une certaine forme d'amertume. D'abord parce que les solutions existent, qu'une littérature abondante et diversifiée décrit des formes d'adaptation possibles et propose des solutions scientifiques, techniques et politiques qui ne sont pas mises en œuvre. Ces solutions se déclinent à différentes échelles, de l'étude locale à la réforme structurelle au niveau national ou européen. Ensuite parce que les ateliers organisés dans le cadre de cette thèse ont résonné avec les mobilisations agricoles récentes observées en France et en Europe. Si ces mouvements ont souvent été réduits médiatiquement et politiquement à des revendications de simplification ou à un rejet des mesures environnementales, j'ai pu percevoir une réalité plus complexe, en particulier un besoin de reconnaissance sociétale et financière et de clarification des politiques publiques. Ce besoin de cohérence est d'ailleurs revenu avec insistance lors des discussions en atelier. Si une partie du monde agricole, marqué par soixante-dix ans d'injonction productiviste, reste largement cloisonnée et braquée face aux injonctions environnementales, perçues comme une remise en cause identitaire et professionnelle, des signaux faibles apparaissent et des discours provenant du monde agricole nuancent cette posture. Parallèlement, les discours des responsables politiques prônant une transition agricole environnementale devraient s'accompagner de la mise en place de politiques publiques fortes, cohérentes et durables, capables de soutenir également sur le plan économique les agriculteurs qui font l'effort de modifier leurs pratiques. Or, durant ces quatre années, j'ai assisté à un recul préoccupant de l'État sur ces questions : ré-autorisation du glyphosate, réintroduction des néonicotinoïdes, allègement des restrictions sur les pesticides, développement des projets de réserves de substitution, recul de l'objectif de « zéro artificialisation nette », réduction du soutien à l'agriculture biologique, affaiblissement des agences environnementales (OFB, ADEME), et désengagement économique vis-à-vis des petites exploitations. Ces décisions constituent autant de régressions que de temps perdu pour préparer nos systèmes et nos sociétés aux bouleversements déjà en cours.

De plus, cet exercice interdisciplinaire a parfois été complexe, dans la mesure où il reposait sur une seule personne malgré l'encadrement pluridisciplinaire, alors que l'interdisciplinarité se pratique le plus souvent en collectif. Il présente également une certaine singularité dans le champ académique, l'interdisciplinarité demeurant peu reconnue et souvent invisibilisée. Elle l'est d'une part parce que la maîtrise des concepts et des méthodes disciplinaires est considérée comme la norme d'un travail de recherche de qualité. Par conséquent, les travaux qui ne répondent pas directement à ces normes, ou qui cherchent à les dépasser en les mettant en relation avec d'autres cadres, se voient fréquemment marginalisés, voire décrédibilisés. D'autre part, ce travail de mise en lien, d'adaptation et de recouplement des concepts, des normes et du vocabulaire constitue un travail de fond considérable mais rarement reconnu, car il ne produit pas une "nouveauté performative", c'est-à-dire une

nouvelle méthode ou un nouvel outil facilement valorisable dans les logiques actuelles de publication scientifique. En ce sens, le travail interdisciplinaire, doublé d'une démarche de frugalité, qui privilégie l'usage de méthodes et d'outils existants plutôt que la création de nouveaux, a pu renforcer cette impression d'un travail perçu comme moins novateur et donc moins valorisable dans le cadre académique.

Aujourd'hui, mes questionnements ne portent plus sur la manière d'implémenter des solutions, car elles existent et sont documentées depuis déjà plusieurs années. J'espère d'ailleurs avoir contribué à cet effort scientifique, en produisant (encore) des résultats sur l'évolution des systèmes et des pratiques agricoles et sur leurs effets sur les écosystèmes, ou encore en proposant des pistes d'accompagnement au changement de pratiques à l'échelle locale. Ce travail, je l'espère, montre que la recherche doit continuer à documenter, à dialoguer, à proposer des alternatives, mais aussi à soutenir activement celles et ceux qui expérimentent et mettent en œuvre d'autres solutions. Ma réflexion s'oriente désormais vers le type de positionnement que doivent prendre les individus qui produisent ces connaissances et disposent de ce savoir, et sur la manière de s'engager autrement que par l'accumulation de nouvelles données et de nouveaux résultats dans une dynamique académique encore largement marquée par le productivisme scientifique.

### 3. Perspectives

#### 3.1 Pistes d'amélioration

La méthodologie proposée comporte plusieurs points qui pourraient être améliorés :

- La difficulté à réunir l'ensemble des parties prenantes s'est particulièrement traduite par l'absence des acteurs des filières locales (coopératives, transformateurs, distributeurs, etc.). Bien qu'identifiés comme indispensables et invités aux ateliers, ils n'y ont pas participé. Cette absence a été régulièrement soulignée par les autres participants, dans la mesure où ces filières structurent fortement le système agricole sur les plans économique et logistique. Des associations de riverains non-agriculteurs auraient également pu être conviées dans la mesure où il y a des tensions importantes actuellement avec les agriculteurs quant à leur pratique et que la position en péri-urbanisation du territoire induit une augmentation potentielle des conflits d'usage sur la question des sols et des pollutions induites dans le futur. Enfin, en fonction de la situation locale, des associations écologistes auraient également pu être conviées, en particulier pour asseoir le point de vue environnementaliste assez peu représenté parmi les parties prenantes.

- La gestion du temps entre les ateliers pourrait également être améliorée, en particulier entre le deuxième et le troisième, séparés par un an. L'intervalle entre ces deux ateliers s'explique par le temps nécessaire à l'utilisation des modèles, afin d'arriver au dernier atelier avec des résultats de modélisation à discuter. Cette durée a compliqué le maintien d'une dynamique collective et a conduit à la présence de nouveaux participants au dernier atelier qui n'avaient pas suivi le processus initial. Il a donc fallu réexpliquer la méthodologie, les images et leurs hypothèses principales, ce qui a ralenti les échanges et affaibli la continuité du travail collectif. Une amélioration consisterait à réduire cet écart temporel et à prévoir des temps intermédiaires de suivi (par exemple sous forme de bilans synthétiques envoyés aux

participants ou de courtes rencontres), afin de maintenir la mémoire partagée et la cohérence de la démarche.

- La présentation des résultats lors du dernier atelier devrait s'accompagner, en plus des indicateurs de rendement et de diminution de la pollution, d'autres indicateurs. Le rendement avait initialement été mobilisé comme proxy pour l'indicateur de résilience et l'indicateur économique (*Pham & Smith, 2014*), mais il apparaît qu'un indicateur économique complémentaire est nécessaire pour permettre aux participants de mieux se projeter dans les différentes images proposées. Néanmoins, il reste difficile de définir un indicateur économique pertinent dans le cadre d'une démarche prospective, contrairement aux indicateurs habituellement utilisés en agriculture, tels que la marge brute standard (*Hayati, 2017*), qui fournissent une mesure plus directe de la viabilité économique des systèmes. Néanmoins, un indicateur de sécurité alimentaire pourrait être utilisé qui prendrait en compte la variabilité des rendements et la disponibilité des cultures liées à l'alimentation (*Allain et al., 2020*). En plus de l'indicateur économique, il serait pertinent d'intégrer un indicateur en lien avec l'évolution de la population agricole comme le nombre d'unités de travail annuel (UTA) mobilisées par système (*Hayati, 2017*).

- L'articulation entre les discussions issues des ateliers et les décideurs politiques constitue également un point d'amélioration. Il serait pertinent d'organiser des séances de restitution spécifiquement dédiées aux responsables politiques locaux (collectivités, chambres d'agriculture, services déconcentrés, agences de l'eau, etc.). Ces restitutions pourraient également prendre la forme de rapports de synthèse clairs, proposant des pistes concrètes comme celles produites lors du dernier atelier, et viser à leur intégration directe dans les dispositifs de planification territoriale (PCAET, SAGE, SRADDET), en complément du CTEC. Cela permettrait de renforcer le dialogue entre échelles locales et institutionnelles et d'assurer une meilleure prise en compte des travaux réalisés.

### 3.2 Adapter la méthodologie aux contraintes locales

La méthodologie développée dans cette thèse peut être adaptée à différents contextes locaux, en fonction des ressources disponibles, des acteurs mobilisables et des dynamiques institutionnelles en place. La Figure 76 propose quelques pistes, en présentant les principaux travaux réalisés étape par étape ainsi que des alternatives adaptées à d'autres cas qui impliquent des ajustements partiels de la méthodologie.

Parmi ces alternatives, on peut retrouver :

- L'identification de personnes-relais disposant d'une bonne connaissance du terrain, des parties prenantes et d'une expertise permet de pallier l'absence d'études locales lorsqu'elles ne sont pas disponibles (par exemple sur les pratiques agricoles, les caractéristiques pédologiques ou les dynamiques socio-économiques) ou lorsque le temps alloué à leur analyse est insuffisant. Ces relais jouent un rôle clé pour accéder à l'information, mobiliser les acteurs, légitimer la démarche et disposer d'ordres de grandeur territorialisées (comme par exemple en termes de rendements, recours à l'irrigation, rotations).

- Si le temps et l'expertise manquent pour produire des récits cohérents et robustes dans le cadre d'ateliers courts, il est possible d'allonger la durée des ateliers afin que les participants

construisent eux-mêmes ces récits. Une autre option consiste à réduire la dimension technique des images pour se concentrer sur le développement des mondes englobants et sur la possibilité d'un agro-hydrosystème répondant aux quatre critères normatifs.

- Recourir à des données climatiques issues d'échelles plus larges (régionale ou nationale), qui sont disponibles en libre accès. L'enjeu est alors de fournir des résultats aussi contextualisés que possible afin de maintenir leur pertinence pour les acteurs locaux. Il est également possible de recourir à des prestataires pour extraire et analyser les scénarios climatiques à l'échelle de la maille.

- L'utilisation de modèles agro-hydrologiques intégrés (IAM) dans un cadre prospectif mérite d'être adaptée selon les ressources disponibles. Dans des contextes contraints, il peut être pertinent de privilégier des modèles plus simples comme des modèles conceptuels de bilan hydrique, comme les bucket model ([Romano et al., 2011](#)), des modèles de type pluie-débit simplifiés, comme par exemple GR4J qui a aussi été utilisé pour produire des résultats lors du premier atelier de diagnostic partagé, ou encore des modèles simplifiés de simulation des rendements des cultures en fonction de l'eau disponible comme AquaCrop ([FAO, 2021](#)). Dans le même ordre d'idée, un autre choix peut être d'utiliser les modèles participatifs ([Etienne et al., 2011](#)), qui facilitent l'appropriation des résultats par les acteurs et leur compréhension du fonctionnement des modèles, mais qui impliquent de consacrer davantage de temps à l'organisation et à la conduite des ateliers. Il est également possible comme suggéré dans le [chapitre 5](#), de recourir à des ordres de grandeurs concernant les rendements et la lixiviation publiés dans la littérature. Cette option permettrait un gain de temps significatif, mais se ferait au détriment du pouvoir de quantification qu'apportent les modèles à l'échelle locale, notamment pour évaluer finement les différences entre les images.

- S'il n'est pas possible d'articuler le dernier atelier avec des organismes capables de relayer ou de financer certaines propositions, une alternative consiste à produire un rapport de synthèse clair et opérationnel, puis à le diffuser auprès des décideurs politiques et institutionnels afin d'espérer que les résultats ne soient pas laissés à l'abandon.

La méthodologie présente cependant des éléments incontournables qui sont :

- Un espace de discussion explicite sur le changement climatique et les changements de pratiques induits.
- Le recours à un animateur formé à la facilitation pour garantir la qualité des échanges.
- La réflexion autour des futurs désirables, structurée par les quatre critères normatifs (désirabilité sociale, viabilité économique, résilience du système, réduction des pollutions).
- Une restitution commune des résultats et une discussion autour de la mise en pratique du changement à court terme.

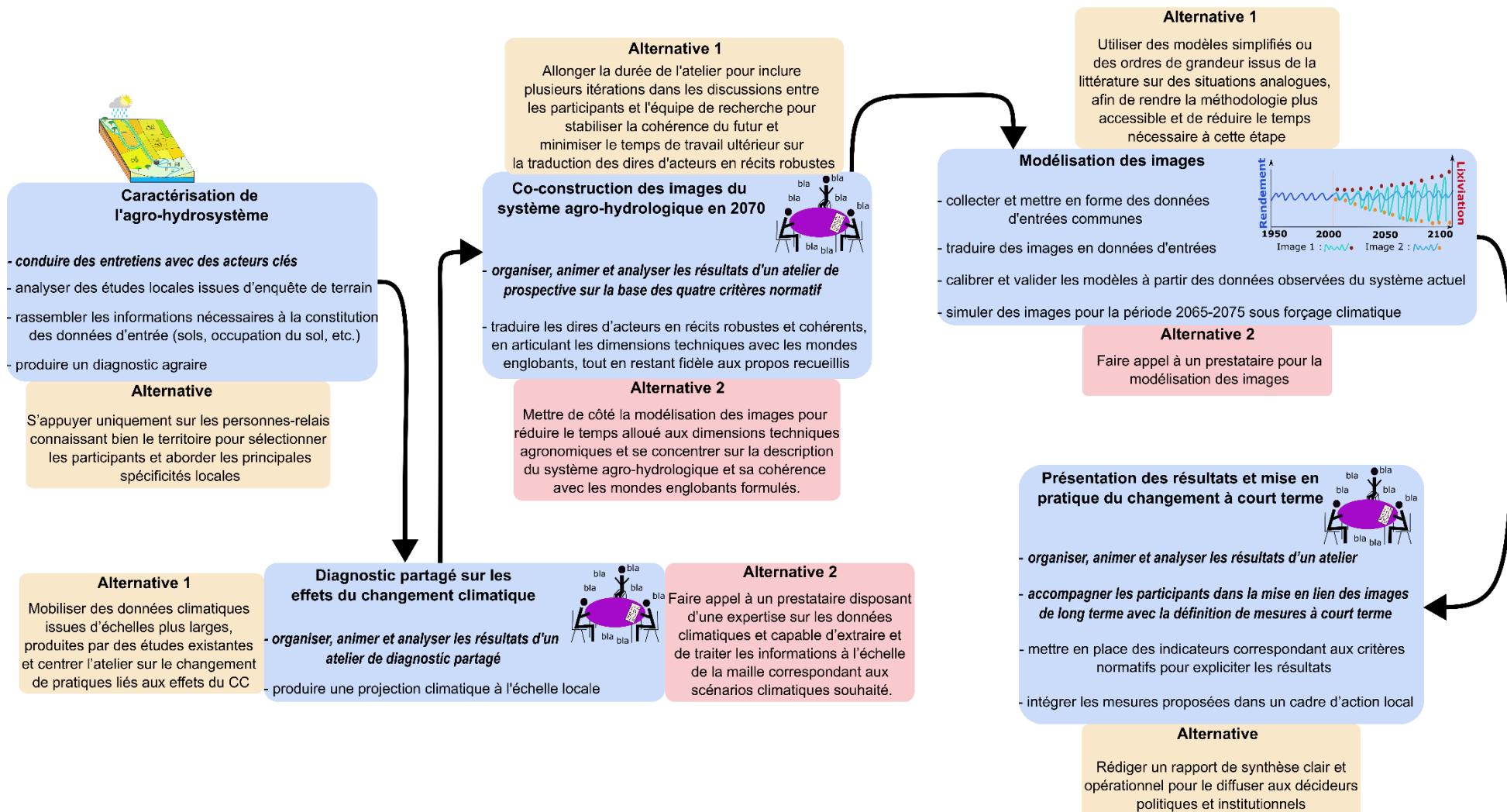


Figure 76. Récapitulatif des différentes étapes de travail de la thèse, des tâches associées à chaque étape et des alternatives possibles selon les contextes (les éléments en italique dans les cadres bleus représentent les composantes incontournables de la méthode)

Un autre cas de figure peut se présenter. Si les contraintes de temps ou de moyens empêchent la mise en œuvre complète de la méthodologie, une alternative consiste à s'appuyer sur le matériel produit dans le cadre de cette thèse (les quatre récits et les résultats de simulation), afin de donner des ordres de grandeur concrets sur les modifications possibles des pratiques agricoles et de leurs effets climatiques. Les discussions peuvent alors se focaliser sur le choix d'action à court terme à mettre en place pour se diriger vers une des images ou vers un mix d'images. Cela peut se structurer sur un temps plus court, en réduisant le nombre d'ateliers, voire en combinant les trois étapes méthodologiques en une seule demi-journée.

### 3.3 Mise en situation

Afin d'assurer une diffusion plus large et une appropriation de cette méthodologie, il est pertinent de développer un dispositif de formation dédié, sous forme de mise en situation. Cette formation, qui sera organisée début 2026, s'adresse principalement à des acteurs institutionnels, en particulier les animateurs de terrain, les agents techniques des collectivités ou des agences de l'eau, ainsi que les financeurs de projets environnementaux, qui jouent un rôle clé dans l'accompagnement des transitions agricoles.

Cette mise en situation permet de reproduire de manière simplifiée les principales étapes de la méthodologie, en s'appuyant sur le cas concret de la Souffel. L'objectif est double : offrir aux participants un cadre pratique pour comprendre le déroulement d'une telle démarche et ouvrir un espace réflexif sur sa transposabilité dans d'autres territoires.

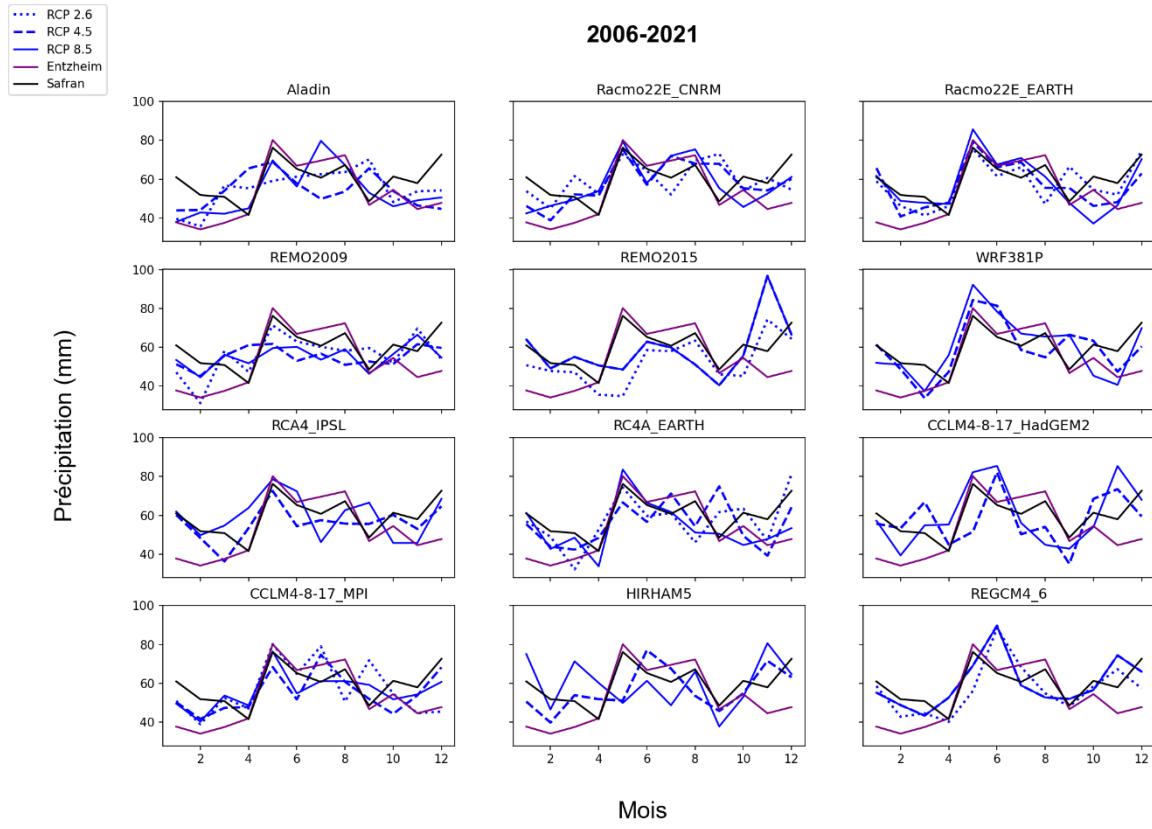
Cette formation vise à :

- (i) Sensibiliser les institutionnels aux difficultés rencontrées dans la mise en œuvre de programmes visant à accompagner les changements de pratiques agricoles, notamment en soulignant les freins sociaux, techniques et politiques qui sont présents à l'échelle locale.
- (ii) Discuter des étapes clés d'une méthodologie éprouvée, en identifiant ses atouts (par exemple, l'utilisation du changement climatique comme levier à des discussions sur la gestion environnementale) mais aussi ses limites (temps long, nécessité d'expertise technique, ressources humaines importantes).
- (iii) Donner aux participants la possibilité de s'approprier la démarche, en les invitant à réfléchir à la manière dont ces étapes pourraient être adaptées et intégrées à la spécificité du territoire sur lequel ils souhaitent travailler, selon leurs contraintes spécifiques (temps, moyens, acteurs déjà mobilisés).

## Références

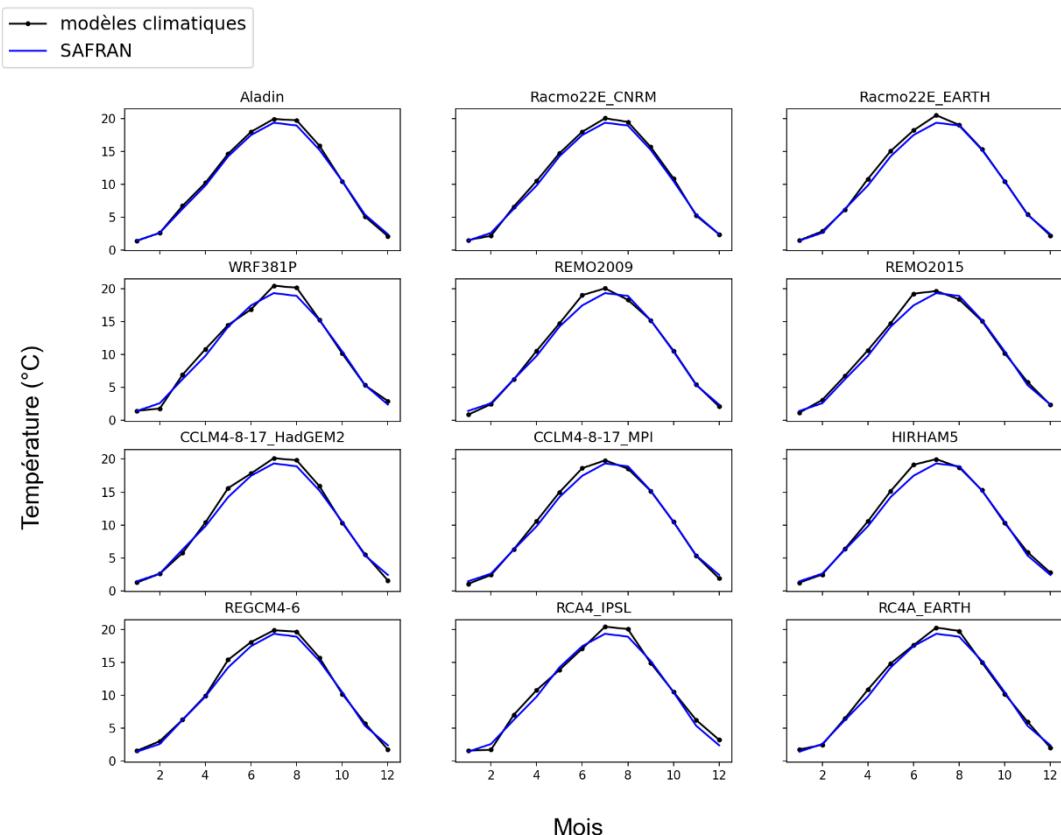
- Delmotte, S., Couderc, V., Mouret, J. C., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J. M., & Hossard, L. (2017). From stakeholders narratives to modelling plausible future agricultural systems. Integrated assessment of scenarios for Camargue, Southern France. *European Journal of Agronomy*, 82, 292-307.
- Etienne, M., Du Toit, D. R., & Pollard, S. (2011). ARDI: a co-construction method for participatory modeling in natural resources management. *Ecology and society*, 16(1).
- Ganivet, E. (2023). *Eau, territoires et changements globaux: vers une approche systémique et participative de modélisation pour concevoir et agir en complexité* (Doctoral dissertation, Université de Rennes).
- Hayati, D. (2017). A literature review on frameworks and methods for measuring and monitoring sustainable agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Pham, L. V., & Smith, C. (2014). Drivers of agricultural sustainability in developing countries: A review. *Environment Systems and Decisions*, 34(2), 326-341.
- Romano, N., Palladino, M., & Chirico, G. B. (2011). Parameterization of a bucket model for soil-vegetation-atmosphere modeling under seasonal climatic regimes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(12), 3877-3893.
- Salman, M., García-Vila, M., Fereres, E., Raes, D. and Steduto, P. (2021). The AquaCrop model – Enhancing crop water productivity. Ten years of development, dissemination and implementation 2009–2019. *FAO Water Report No. 47*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7392en>
- Sloep, P. B. (1994). The impact of 'sustainability' on the field of environmental science.

## **Annexes**



*Annexe 1. Evolution des précipitations moyennes mensuelles calculées à partir des données journalières de la station météo Entzheim, de la maille SAFRAN relative au site d'Entzheim et des différents scénarios (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5) de chacun des modèles de la DRIAS sur la période 2006-2021.*

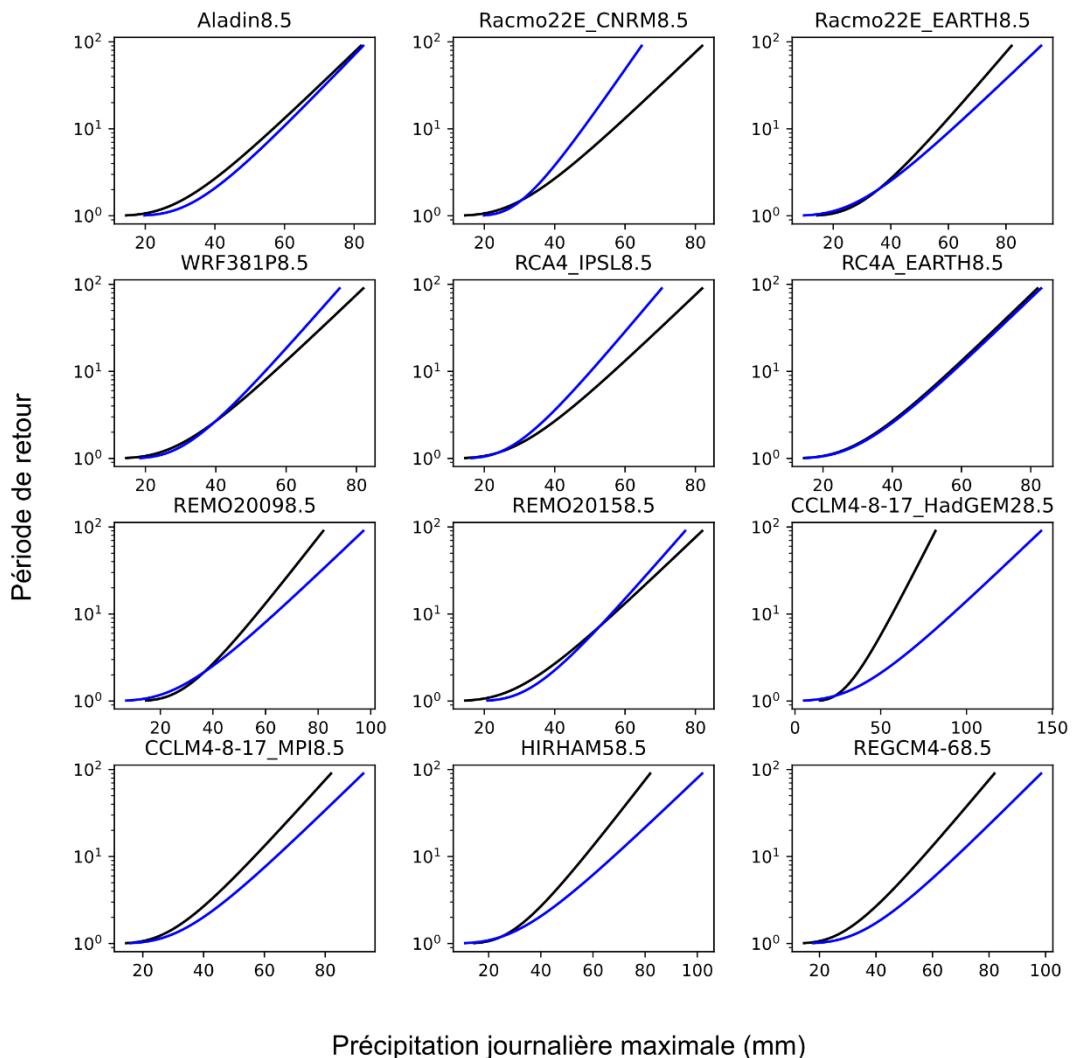
b



Annexe 2. Evolution des températures moyennes mensuelles calculées à partir des données journalières de la maille SAFRAN relative au site d'Entzheim et des modèles de la DRIAS, RCP 8.5.

— Brumath  
— Modèle

**2005-2021**



Annexe 3. Distribution de Gumbel entre les modèles climatiques (EURO-CORDEX) et observées simulées à Brumath (SAFRAN) sur la période 2005-2021.

Atelier 2 : Des scénarios pour l'agriculture du bassin en 2070  
**Support 1 : Les principes de l'agriculture 2070**

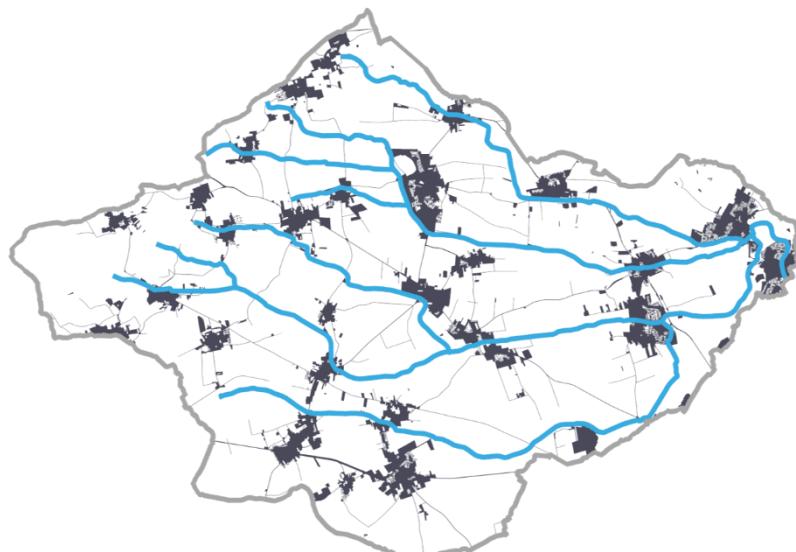
**Une agriculture résiliente  
au changement climatique**

**Une agriculture moins  
polluante**

**Une agriculture désirable  
professionnellement**

**Une agriculture viable  
économiquement**

Atelier 2 : Des scénarios pour l'agriculture du bassin en 2070  
**Support 2 : Cartographie du bassin en 2070**



Caractéristiques « techniques »	
Taille des EA (+ position dans le bassin)	
Cultures principales / Élevages / Prairies	
Origines et apports en nutriments	
Apports des moyens de protection des cultures	
Irrigation	
Matériel agricole	
Éléments paysagers et structurals	
...	

Annexe 4. Supports distribués aux participants lors du deuxième atelier permettant de discuter des quatre critères normatifs et des caractéristiques techniques du système Souffel.

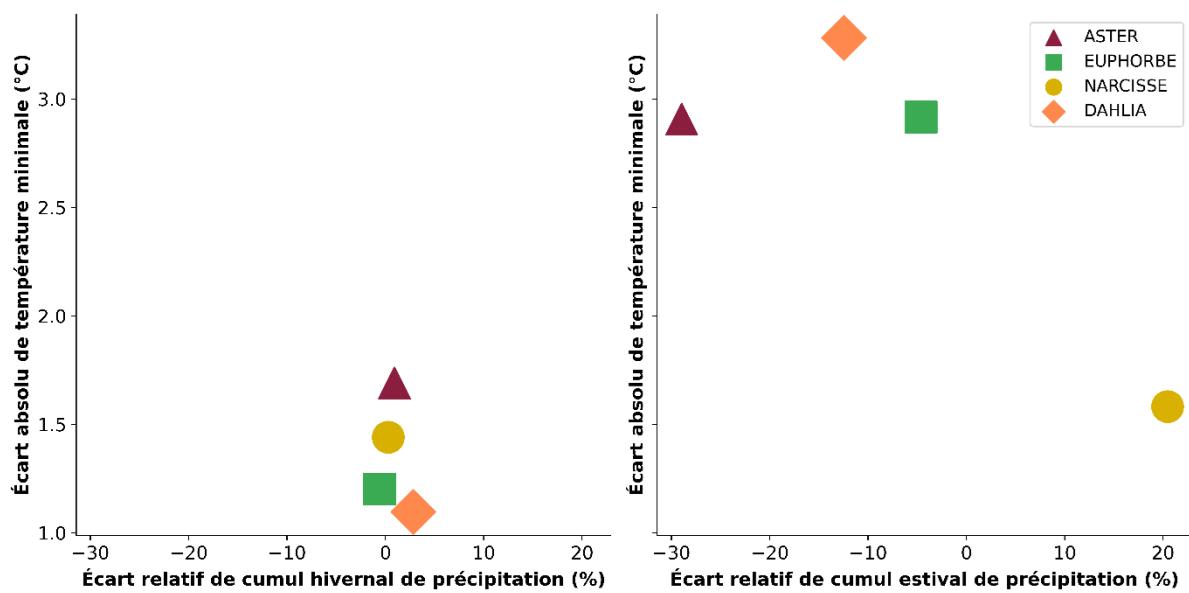


Atelier 2 : Des scénarios pour l'agriculture du bassin en 2070

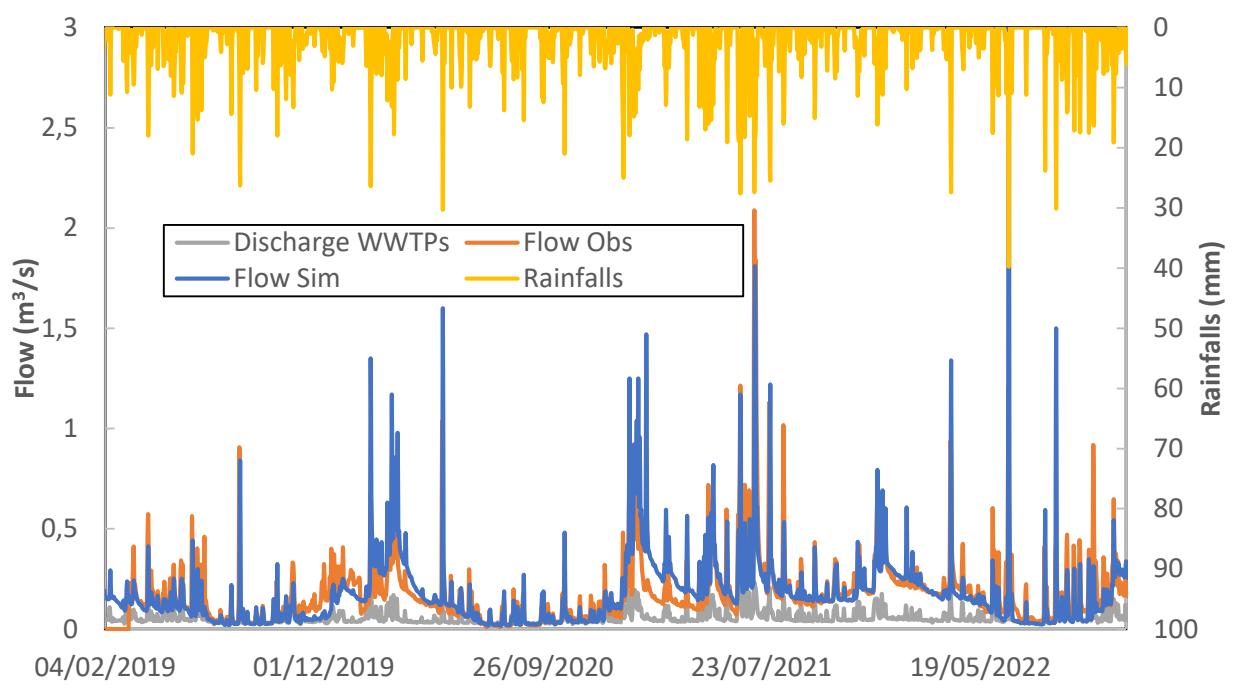
### Support 3 : Le contexte social et politique en 2070

	2070	2022	Évènements marquants	2070
Filières et débouchés (alimentation, énergie, industrie...)			→	
Disponibilité de la ressource en eau (techniques, sources...)			→	
Attractivité du métier (pression sociale, bien-être...)			→	
Tensions et conflits sur le territoire			→	
Politiques publiques (accompagnement, subvention, contrats...)			→	
...			→	
...			→	

*Annexe 5. Support distribué aux participants lors du deuxième atelier permettant d'ouvrir la discussion au contexte social et politique en 2070 visant à décrire les mondes englobants.*



Annexe 6. Identification des narratifs Explore 2 (scénarios RCP 8.5) par représentation des écarts de précipitation et de température minimale sur la période 2065-2075 par rapport à la période 2015-2023 sur la maille centrale de la Souffel.



*Annexe 7. Hydrogramme représentant les différents flux (débits simulés et observés, rejet de STEP et précipitation) après le processus de calibrage (2019-2022), (Picot, 2024).*

<b>Indicators</b>	<b>Daily</b>	<b>Weekly</b>
<b>NSE</b>	0.24	0.97
<b>LogNSE</b>	0.66	0.80
<b>KGE</b>	0.50	0.86
<b>PBIAS</b>	-3.57	-9.83
<b>R<sup>2</sup></b>	0.64	0.99

*Annexe 8. Indicateurs de performance du modèle après étalonnage (2019-2022) (Picot, 2024).*



## Engager la transformation d'un agro-hydrosystème en combinant prospective, participation et simulation : mise au point d'une méthode générique à partir du cas du bassin versant de la Souffel.

### Résumé

Le changement climatique va nécessiter des adaptations profondes des pratiques agricoles. Cela peut fournir de surcroît un levier stratégique pour tenter de diminuer leurs impacts qualitatifs et quantitatifs sur les masses d'eau. C'est dans cette perspective qu'a été conduite cette recherche sur le bassin versant de la Souffel, près de Strasbourg. Cette rivière est marquée par les pressions exercées par une agriculture intensive avec des concentrations en nitrates et pesticides au-delà du bon état écologique malgré plus de trente ans de politiques d'accompagnement. La méthode interdisciplinaire mise au point repose sur une prospective participative, faisant émerger des images d'une agriculture viable et désirable à l'horizon 2070, modélisées dans un deuxième temps à l'aide de modèles agro-hydrologiques, le tout dans une logique de frugalité (pas de nouveaux outils, ateliers courts, etc.). Trois ateliers participatifs ont été menés avec les acteurs locaux. Le premier, consacré au diagnostic partagé, a révélé un consensus sur les effets déjà ressentis du changement climatique ; il a montré que les acteurs avaient déjà commencé à s'adapter pour y faire face. Le second atelier a permis de co-construire des images à l'horizon 2070 selon quatre critères normatifs : résilience climatique, moindre pollution, attractivité professionnelle et viabilité économique. Une méthodologie a été développée pour transformer les dires d'acteurs en images cohérentes, robustes et fidèles. Celles-ci ont ensuite été modélisées via SWAT+ et MAELIA sous forçage climatique à partir des scénarios EXPLORE 2. Les pratiques agricoles et les facteurs climatiques apparaissent comme deux variables interdépendantes influençant à la fois les rendements et les lixiviations en nitrates. Sur la base de ces résultats, le troisième atelier a permis d'engager une discussion sur ces différentes images et d'élaborer des pistes concrètes en vue de la concrétisation des trois images retenues (e.g. création de nouvelles filières écologiques...). Mené en partenariat avec les acteurs institutionnels, cet atelier final permet d'envisager l'intégration des mesures proposées dans les politiques territoriales. Cette approche interdisciplinaire a permis de lier préservation de la ressource et adaptation au climat à l'échelle d'un territoire, en proposant des mesures concrètes pour renforcer la résilience de l'agro-hydrosystème. Il reste à explorer des alternatives pour en faciliter la généralisation à d'autres territoires.

**Mots clés :** prospective, modélisation agro-hydrologique, participation, interdisciplinarité, changement climatique

### Abstract

Climate change will require profound shifts in agricultural practices, but it also offers a strategic opportunity to reduce farming's quantitative and qualitative pressures on water resources. This study focuses on the Souffel catchment, near Strasbourg, a river long affected by intensive agriculture and still heavily polluted despite three decades of policy support. The interdisciplinary approach combined participatory foresight, which encouraged stakeholders to imagine desirable and viable forms of agriculture by 2070, with agro-hydrological modelling, all within a deliberately frugal framework (using no new tools, short workshops, etc.). Three participatory workshops structured the process. The first, a shared diagnosis, revealed consensus on a tangible impacts of climate change and indicated that local actors had already begun adapting. The second co-created visions for 2070, guided by four normative criteria: climate resilience, reduced pollution, professional attractiveness, and economic viability. A dedicated methodology ensured that stakeholder contributions were translated into consistent, credible, and representative futures, which were then modeled using SWAT+ and MAELIA under climate forcing from EXPLORE 2 scenarios. Results highlighted the interdependence between agricultural practices and climate factors in shaping both yields and nutrient leaching. Building on this, the third workshop explored practical pathways to implement three selected futures, such as creating new ecological value chains. Conducted in partnership with institutional actors, this final stage laid the groundwork for integrating proposed measures into territorial policies. Overall, the interdisciplinary approach proved effective in linking resource preservation with climate adaptation at the local scale, while underscoring the need to explore complementary approaches to enable broader application across territories.

**Keywords:** foresight, agro-hydrological modelling, participation, interdisciplinarity, climate change