

MAINTIEN DU MARAICHAGE DANS UN CONTEXTE DE RAREFACTION DE L'EAU : ETUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES BESOINS EN IRRIGATION DU PLATEAU DE SACLAY A L'HORIZON 2060 ET PERSPECTIVES

SOLENN NGUYEN VIEN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN AGROECOLOGIE**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

(CO)-PROMOTEUR(S) : ERWAN PERSONNE, NICOLAS VEREECKEN

LECTEURS : CHRISTINE AUBRY, DOROTHEE DENAYER

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

MAINTIEN DU MARAICHAGE DANS UN CONTEXTE DE RAREFACTION DE L'EAU : ETUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES BESOINS EN IRRIGATION DU PLATEAU DE SACLAY A L'HORIZON 2060 ET PERSPECTIVES

SOLENN NGUYEN VIEN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN AGROECOLOGIE**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

(CO)-PROMOTEUR(S) : ERWAN PERSONNE, NICOLAS VEREECKEN

LECTEURS : CHRISTINE AUBRY, DOROTHEE DENAYER

Le travail de fin d'études a été réalisé avec les UMR Ecosys et UMR Sadapt de l'INRAE.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier les maraicher·ères qui m'ont accueillie dans leurs fermes pour des stages, Nini, Chris, Juliette et Fabien. Sans ces expériences, je n'aurais pas développé cet engouement pour le maraichage.

Ensuite, je souhaite aussi remercier tous les enseignant·es du master d'agroécologie qui m'ont permis d'un peu mieux comprendre le monde dans lequel nous évoluons et celui dans lequel j'aimerais que nous évoluions ; un merci particulier à Pierre Stassart qui m'a permis d'appréhender les enjeux liés à la transition agroécologique ; un merci particulier à Marjolein Visser pour ses enseignements précieux sur les agroécosystèmes et l'agroécologie ; un merci particulier à Barbara Haurez pour ses enseignements importants sur la gestion agroécologique de la fertilité des sols ; enfin, un merci particulier à Nicolas Vereecken pour ses enseignements divers et toujours passionnants, notamment ceux sur l'agriculture urbaine et péri-urbaine. Un autre merci à Nicolas Vereecken pour la mise en contact avec l'équipe de ClimaLeg-Eau et pour le suivi de mon mémoire en tant que promoteur.

Je souhaite ensuite remercier tout particulièrement mon second promoteur, Erwan Personne. Merci de m'avoir accueillie au sein de l'UMR Ecosys, de m'avoir fait confiance et merci pour ton soutien impeccable dans ce travail, tant humainement que techniquement. Merci aussi à Christine Aubry de m'avoir accueillie dans le projet, de m'avoir fait confiance et d'avoir été si enthousiaste quant à mon travail. Merci pour cette positivité que tu apportais à chacune de nos réunions d'avancements. Merci Nabil pour l'aide apportée lors de mon stage.

Merci aussi aux autres membres INRAE qui m'ont aidé à un moment ou un autre de mon stage tels que Léa Boros, Antoine Tardif et Baptiste Arzac. Merci aux personnes qui ont bien voulu nous donner un peu de temps dans le cadre du projet pour des entrevues, notamment merci aux maraichers de la ferme de Gisy. Merci aussi à Gabriella d'avoir été de si bonne compagnie et d'avoir apporté de la joie dans notre bureau de stagiaires.

Enfin, un immense merci à ma famille et à ma famille étendue, mes ami·es. Merci à tous et toutes d'avoir été là pour moi pendant cette période qui fut éprouvante. Vous m'apportez force et espoir. Sans vous, je n'en serai pas là. Un merci particulier à mon papa et à Juliane pour leurs regards éclairés et leurs remarques pertinentes qui m'ont permis d'améliorer ce mémoire.

Résumé

Le changement climatique et les sécheresses consécutives mettent à défi l'agriculture en France notamment le maraichage qui dépend de la ressource en eau pour perdurer. Les besoins d'irrigation sont grandissants dans le milieu agricole et l'eau se raréfie. Le maraichage étant une agriculture nourricière qui peut répondre au double critère de santé humaine et environnementale, il existe un enjeu à ce que cette agriculture puisse perdurer dans un contexte de raréfaction de la ressource en eau liée au changement climatique. Ce mémoire s'articule donc autour de la problématique « Comment faire perdurer le maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau sous l'impact du changement climatique ? ».

Dans le cadre du projet ClimaLeg-Eau de l'INRAE, un premier axe de travail permet d'estimer l'impact du changement climatique sur les besoins en irrigation du maraichage en plein champ à l'horizon 2060 sur le plateau de Saclay. Pour cela, un modèle de bilan hydrique a été développé en se basant sur le calcul par double coefficient de l'évapotranspiration selon le document de la FAO No.56. Ce modèle a été simulé avec des données climatiques Siclima projetées à l'horizon 2060 selon le scénario intermédiaire RCP 4.5 du GIEC. Ainsi, sur le plateau de Saclay et sous l'effet du changement climatique, le modèle permet d'estimer que les besoins en irrigation pour les cultures plein champ d'une ferme maraichère pourraient augmenter à minima d'environ 17% d'ici 2060 par rapport au présent. Le modèle met aussi en exergue l'importance de la couverture du sol sur les besoins en irrigation en plein champ. Cette pratique permettrait, pour une ferme maraichère en plein champ, une réduction de ses besoins en irrigation d'au moins 22% en 2060 par rapport à une culture sur sol nu.

Un second axe de travail vient compléter le premier en abordant un point de vue systémique et présente un certain nombre de conditions qui semblent essentielles afin que le maraichage puisse véritablement perdurer dans un contexte de raréfaction de la ressource en eau liée au changement climatique. Tout d'abord, les fermes maraichères vont devoir mettre en place des stratégies d'adaptation qui requièrent une réelle reconception des agroécosystèmes et une gestion agroécologique de la ressource en eau. Des solutions sont présentées. Puis, cette adaptation doit être soutenue et accompagnée par tous·tes les acteur·trices concerné·es afin que les risques liés au climat qui pèsent sur le maraichage soient partagés. Des perspectives sont présentées. Enfin, pour perdurer, le maraichage doit avoir un accès sécurisé à l'eau d'irrigation, qui est actuellement entravé. Dans cette perspective, des pistes sont présentées pour mettre en place une réglementation permettant une gestion de l'eau territorialisée, équitable et durable.

Abstract

Climate change and consecutive droughts are challenging agriculture in France, especially for vegetable production, which depends on water resource to survive. The need for irrigation water is growing, and water is becoming increasingly scarce. Since vegetable production is a nourishing form of agriculture that can meet the twofold criteria of human health and environment health, there is a real challenge for this type of farming to survive in a context of increasing water scarcity due to climate change. This dissertation is therefore based on the question "How can vegetable production survive in a context of water scarcity under the impact of climate change?".

As part of INRAE's ClimaLeg-Eau project, a first line of work is aimed at estimating the impact of climate change on the irrigation needs of open-field vegetable production on the Saclay plateau by 2060. For this purpose, a water balance model was developed based on the double coefficient calculation of evapotranspiration according to FAO No.56 paper. This model was simulated using Siclima climate data projected to 2060 according to the IPCC's RCP 4.5 intermediate scenario. Thus, on the Saclay plateau and under the effect of climate change, the model enables us to estimate that irrigation requirements an open-field vegetable farm could increase by at least around 17% by 2060 compared with the present. The model also highlights the importance of soil cover on irrigation needs in the open field. For an open-field vegetable farm, this practice would mean a reduction in irrigation requirements of at least 22% in 2060, compared with cultivation on bare soil.

A second line of work complements the first by taking a systemic viewpoint and presenting a few conditions that seem essential if vegetable production is to truly endure in a context of increasing water scarcity linked to climate change. First and foremost, vegetable farms will have to implement adaptation strategies that require a genuine redesign of agro-ecosystems and agro-ecological management of water resources. Solutions are presented. Then, this adaptation must be supported and accompanied by all the players at stake, so that the climate-related risks weighing on vegetable production are shared. Perspectives are presented. Finally, to survive, vegetable production needs secure access to irrigation water. At the moment, access to water is hampered. A few ideas are put forward for the introduction of regulations that will enable water management to be territorialized, equitable and sustainable.

Table des matières

I.	Problématisation	10
	Interface entre changement climatique et maraichage	10
	Définition du maraichage.....	10
	Définition du changement climatique.....	11
	Le changement climatique en France	11
	Les relations entre changement climatique et maraichage	12
	Pour que le maraichage perdure face au changement climatique	13
	Le maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau	15
	Cadre de travail : le projet Climaleg-eau	15
	Le maraichage et la raréfaction de l'eau	15
	Présentation de la question de recherche	16
II.	Matériel et méthodes	19
	Définition d'un bilan hydrique.....	19
	Le développement du modèle	21
	Hypothèses sur le bilan hydrique.....	21
	Les données climatiques Siclima	22
	Le calcul de l'évapotranspiration.....	22
	Technologie utilisée	23
	Le modèle développé	23
	Description et fonctions	23
	Les données des simulations.....	25
	En résumé.....	27
III.	Résultats et analyse.....	28
	Résultat des tests de sensibilité	28
	Les tendances des besoins en irrigation à l'horizon 2060	30
	Par cultures.....	30
	Par successions de cultures typiques.....	32
	L'impact du couvert du sol.....	35
	A retenir.....	36
IV.	Discussion.....	37
	La « sine qua non » adaptation des fermes maraichères	37
	A travers une gestion agroécologique de la ressource en eau	37
	Qui doit aller de pair avec un partage des risques liés au climat	39
	Mais aussi un accès sécurisé à l'eau d'irrigation	41
V.	Conclusion.....	45
VI.	Bibliographie	46
VII.	Annexes	49

Liste des abréviations

- AMAP : Associations pour le maintien d'une agriculture paysanne
- ETM : Evapotranspiration maximale
- ETP : Evapotranspiration potentielle
- ETR : Evapotranspiration réelle
- FAO : Food and agriculture organization
- GES : Gaz à effet de serre
- GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
- OUGC : Organismes uniques de gestion collective
- RCP : Representative Concentration Pathway
- RDU : Réserve difficilement utilisable
- RFU : Réserve facilement utilisable
- RU : Réserve utile
- SAU : Surface agricole utile
- TCD : Tableaux croisés dynamiques
- TFE : Travail de fin d'études
- ULB : Université libre de Bruxelles
- ULIEGE : Université de Liège
- UMR : Unité mixte de recherche
- VBA : Visual Basic for Applications
- ZRE : Zones de répartitions des eaux

Table des Annexes

Annexe 1 : tutoriel d'utilisation du modèle	49
Annexe 2 : test de sensibilité maille géographique.....	52
Annexe 3 : test sensibilité profondeur d'enracinement.....	54
Annexe 4 : test de sensibilité seuil de RFU	55
Annexe 5 : test de sensibilité RCP.....	56
Annexe 6 : impact du couvert du sol sur l'évaporation	57

Tables des Illustrations

Figures

Figure 1 : schéma d'un bilan hydrique	19
Figure 2 : localisation géographique de la maille 1679	25
Figure 3 : modèle de courbe tendancielle des besoins en irrigation	28
Figure 4 : évolution des besoins en irrigation de la tomate, aubergine, courgette, carotte, laitue entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay.....	30
Figure 5 : évolution des besoins en irrigation des successions typiques 1 et 2 entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay	32
Figure 6 : évolution des besoins en irrigation des successions typiques 1 et 2 entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay et cadre consommations moyennes d'une ferme maraichère	34
Figure 7 : évolution des besoins en irrigation de la succession typique 2 entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay, comparaison différents traitements du sol	35

Tableaux

Tableau 1 : nature de la succession de cultures type 1	26
Tableau 2 : nature de la succession de cultures type 2.....	26
Tableau 3 : impact de différents paramètres sur l'ordonnée à l'origine et/ou la pente de la courbe tendancielle des besoins en irrigation.....	29
Tableau 4 : comparaison des besoins en irrigation calculés par le BRL et par le modèle	31
Tableau 5 : augmentation des besoins en irrigation pour les cultures de la tomate, aubergine, courgette, carotte, laitue, prévus pour 1 an, sur 50 ans ou 100 ans	31

La volonté d'orienter mon travail sur l'interface changement climatique et maraîchage est issue d'une expérience saisissante lors d'un stage de maraîchage en Bretagne à la ferme maraîchère de l'Orme lors de l'été 2022. Cet été fut extrêmement sec et chaud. Les cultures maraîchères ont été très impactées par la sécheresse mais aussi par l'apparition de nouveaux ravageurs. Originellement, je souhaitais orienter mon travail de mémoire sur la question de l'énergie au sein d'une ferme maraîchère d'où mon choix de stage au sein de cette ferme qui pratique la traction animale. Je me suis cependant vite rendu compte que le premier facteur bloquant pour le maraîchage est le changement climatique. J'ai pris conscience qu'il est urgent de s'engager pour aider les maraîchères à faire face à ce phénomène. Ce travail constitue ma contribution à cet engagement. Ce rapport synthétise le travail réalisé de février à mai 2023, dans le cadre de mon travail de fin d'études (TFE) du Master d'Agroécologie de l'ULiège et l'ULB et d'un stage au sein des UMR Ecosys et Sadapt de l'INRAE.

I. Problématisation

Cette partie a pour objectif de cadrer et contextualiser le travail de recherche réalisé mais aussi de présenter la question de recherche qui a animé ce TFE ainsi que les pistes explorées pour y répondre.

Une première partie « Interface entre changement climatique et maraîchage » permet d'explicitier les termes de maraîchage et de changement climatique, puis pose un diagnostic du changement climatique en France et présente la relation ambivalente entre le changement climatique et le maraîchage à travers les impacts de l'un sur l'autre. Pour finir, il est expliqué pourquoi le maraîchage doit perdurer dans un contexte de changement climatique.

Une seconde partie « Le maraîchage dans un contexte de raréfaction de la ressource en eau » présente le projet ClimaLeg-Eau de l'INRAE qui a permis de cadrer mon travail à travers le prisme de la ressource en eau, puis, cette partie explicite les liens entre le maraîchage, l'eau et sa raréfaction. Pour finir, ma question de recherche est présentée ainsi que les questions subsidiaires qui m'ont permis d'y répondre, du moins en partie.

Interface entre changement climatique et maraîchage

Définition du maraîchage

Le maraîchage est « la culture de végétaux à usage alimentaire, et plus particulièrement de légumes, de manière professionnelle, c'est-à-dire dans le but d'en faire un profit ou simplement d'en vivre, ce qui le distingue du jardinage » (Wikipédia, 2023). Les légumes peuvent être cultivés en plein air, dénommés comme « cultures plein champ » ou bien sous serre. Généralement, une ferme maraîchère présente la majeure partie de surface agricole utile (SAU) en plein champ et une plus faible partie de sa SAU est sous serre permettant de cultiver l'hiver et/ou de faire des cultures primeurs.

Le maraîchage peut être pratiqué de diverses manières : en agriculture biologique ou conventionnelle, cultivant une plus ou moins grande diversité de légumes, sur des grandes surfaces ou très réduites, avec un degré de motorisation qui varie d'une ferme à l'autre, associé à de la traction animale ou pas, en « maraîchage sur sol

vivant”, associé à de l’agroforesterie, par des agriculteur·trices issues du milieu agricole ou des maraîcheur·trices, avec un canal de commercialisation conventionnel ou en circuits courts... En bref, le maraichage est aussi divers qu’il existe de fermes maraichères et toutes peuvent prendre différentes formes selon leur degré d’engagement dans des pratiques agroécologiques ou paysannes.

Dans ce rapport, lorsque est utilisé le terme de maraichage de proximité cela fait référence au maraichage dont les produits sont vendus en circuits courts c’est-à-dire, sans aucun intermédiaire entre le·a maraîcheur·ère et le·a mangeur·euse donc en vente directe ou par le biais d’un·e seul·e intermédiaire.

Définition du changement climatique

Le changement climatique, parfois aussi appelé dérèglement climatique ou réchauffement climatique, est un phénomène qui est observé dès le 19ème siècle et prédit la première fois par un chimiste suédois en 1896 (Oppenheimer, 2022). Ce phénomène a été profondément investigué dans la sphère scientifique notamment depuis l’avènement du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) créé en 1988. Désormais, grâce à ce travail scientifique de grande ampleur, l’origine anthropique du changement climatique fait consensus (Marshall, 2022). Nous savons donc que ce sont les émissions de gaz à effet de serre (GES) issues de nos activités humaines qui provoquent le réchauffement climatique. Quant aux impacts, nous savons que le réchauffement climatique a déjà entraîné des changements irréversibles sur la planète et nous pouvons également déjà observer les effets directs et indirects néfastes du changement climatique. Ces impacts sont inégalement répartis dans les régions du monde mais tous les secteurs sont concernés (GIEC, 2023) notamment le système alimentaire avec laquelle le changement climatique entretient une relation ambivalente. En effet, nos systèmes alimentaires sont à l’origine de 21 à 37% des émissions anthropiques de GES (GIEC, 2019) tandis que le changement climatique entraîne des répercussions importantes sur l’agriculture et menace la sécurité alimentaire. D’une manière générale face aux conséquences du changement climatique, le GIEC préconise l’adaptation mais également les actions de mitigation pour réduire nos émissions de GES et ainsi limiter le réchauffement climatique car plus l’espèce humaine prendra de temps à modifier sa manière d’habiter la terre, plus l’adaptation sera difficile (GIEC, 2023). L’adaptation consiste à « anticiper les effets négatifs du changement climatique et à prendre les mesures appropriées pour prévenir ou minimiser les dommages qu’ils peuvent causer » tandis que la mitigation consiste à « rendre les effets du changement climatique moins graves en empêchant ou en réduisant l’émission de GES dans l’atmosphère » (European Environment Agency, 2023).

Le changement climatique en France

Le changement climatique est en cours en France et il est estimé que le réchauffement a lieu depuis 1900 avec une augmentation plus marquée depuis 1980. Le changement climatique se aussi traduit par un nombre annuel de journées chaudes en augmentation et un nombre annuel de jours de gel en diminution (Ministère Ecologie Energie Territoires, 2022).

Quant à l'évolution future du climat en France, il est possible de l'extrapoler en prenant en compte les différents scénarii de l'évolution de la concentration de GES dans l'atmosphère développés par le GIEC. Ces scénarii sont dénommés « Representative Concentration Pathway » (RCP) et s'échelonnent du plus optimiste RCP 2.5 au plus pessimiste RCP 8.5.

Selon les travaux de la Drias, le climat en France devrait se traduire par une hausse de la température moyenne jusqu'en fin de siècle quelques soient les scénarii utilisés. Cette hausse se traduira aussi par une augmentation des extrêmes : le nombre de jours de vagues de chaleur devrait augmenter d'ici la fin de siècle jusqu'à atteindre une multiplication par 10 dans le pire des scénarii, inversement, le nombre de jours de vagues de froid ou de gelée est en baisse dans tous les scénarii jusqu'à devenir un évènement rare dans les scénarii les plus pessimistes. Concernant les précipitations, à l'échelle de la France, le cumul moyenné devrait être en légère hausse pour les trois scénarii cependant cette tendance est contrastée par une forte modulation saisonnière avec une hausse systématique en hiver et une baisse quasi systématique en été. Cette forte modulation s'associe avec une intensité des pluies extrêmes qui augmentera légèrement durant le siècle quel que soit le scénario considéré, et à l'inverse, dans les scénarii intermédiaire et pessimiste, la durée des épisodes de sécheresse météorologique augmentera de 30 à 50% (Soubeyroux et al., 2020). La sécheresse météorologique « correspond à un déficit prolongé de précipitations » (INRAE, 2020).

Dans ce rapport, lorsque le futur est évoqué pour décrire les impacts du changement climatique, cela ne nie pas pour autant ceux qui sont déjà en cours ou ont déjà eu lieu.

Les relations entre changement climatique et maraichage

Il fait consensus que le climat en France va continuer à changer drastiquement et mettre à défis les productions maraichères car celui-ci va avoir de nombreux impacts sur le maraichage. Ce changement climatique va affecter la qualité nutritionnelle des plantes maraichères ainsi que leur développement et donc, la productivité du maraichage (Bisbis et al., 2017).

En effet, sous l'effet d'un plus grand taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, la plante présente le risque de produire un tissu avec une qualité nutritionnelle moindre (Bisbis et al., 2017). Puis, les conditions météorologiques vont impacter le développement des plantes. En ne prenant en compte que la température, d'une manière générale, le réchauffement climatique va induire un allongement de la période de culture. Cependant, cet aspect positif lié au changement climatique sera contrebalancé par d'autres impacts. D'une part, pour certaines espèces, la baisse du nombre de jours de froid peut causer une vernalisation insuffisante qui est défavorable pour certaines plantes maraichères comme le chou-fleur par exemple. Des hivers plus doux peuvent aussi entraîner un refroidissement hivernal chez les plantes vivaces telles que la rhubarbe et l'asperge. D'autre part, la hausse des vagues de chaleur pourrait accélérer le développement de la plante en stress thermique et en conséquence avoir un impact important sur les rendements (Bisbis et al., 2017). Ensuite, en prenant également en compte les précipitations, la hausse des pluies extrêmes pourrait amener à un

endommagement physique de la plante, tandis que l'augmentation de la fréquence des sécheresses météorologiques associée à l'augmentation des températures, vont aboutir à l'augmentation en fréquence des sécheresses dites édaphiques, du sol, que l'on qualifie aussi de sécheresses agricoles (INRAE, 2020). Ces sécheresses édaphiques vont placer la plante dans un état de stress hydrique pouvant la mener jusqu'à son flétrissement dans le pire des cas, si elle n'est pas irriguée (Bisbis et al., 2017).

Ce sont donc de nombreuses perturbations qui vont constituer des défis le maraichage. Les actions concomitantes de ces impacts du climat sur le maraichage sont de l'ordre de l'adaptation. D'une manière générale, les voies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique sont bien renseignées dans la littérature et le GIEC préconise entre autres, avec un degré de confiance élevé, l'amélioration des cultivars, la gestion et le stockage de l'eau dans les exploitations, la conservation de l'humidité des sols, l'agroforesterie, l'adaptation communautaire, la diversification de l'agriculture au niveau des exploitations et des paysages, l'utilisation de principes et de pratiques agroécologiques (GIEC, 2023). L'autre forme d'action préconisée par le GIEC se trouve dans la mitigation. Outre les impacts du changement climatique sur le maraichage, le maraichage, comme tout autre production, peut plus ou moins participer à dégrader le climat, selon la forme qu'il prend. Il existe différents facteurs qui rentrent en compte comme le degré de motorisation de la ferme maraichère, son degré d'utilisation d'intrants et notamment d'intrants de synthèse, son mode de commercialisation mais également son rapport au stockage de carbone dans les sols.

Bien que le maraichage et le changement climatique entretiennent des relations complexes et qui vont tendre à se complexifier d'avantage, il est important que le maraichage puisse perdurer dans le futur. Il faut ainsi réfléchir aux actions d'adaptation et de mitigation qui interfèrent dans les relations changement climatique et maraichage. Dans le prochain paragraphe, voici les raisons qui me poussent à penser que le maintien, et plus encore le développement du maraichage, sont importants dans un contexte de changement climatique.

Pour que le maraichage perdure face au changement climatique

Ce travail se veut inclusif de toutes les formes de maraichage cependant, je tiens à souligner que le focus de ce travail sur le maraichage trouve sa raison d'être car sous certaines conditions, le maraichage est une agriculture particulièrement intéressante. En effet, sa production peut répondre au critère double de santé environnementale et humaine (Willet et al., 2019).

Les formes de maraichages qui permettent de répondre au mieux à ce double critère sont celles qui ont été étudiées par Kevin Morel dans sa thèse, thèse qui a permis de prouver leur viabilité (Morel, 2016). On pourrait les qualifier de micro-fermes maraichères biologiques de proximité, qui, d'après les mots de Kevin Morel, ont en commun « d'être installées sur de très petites surfaces, peu ou pas mécanisées, de produire une grande diversité de cultures vendues en circuits courts et de mettre en œuvre des pratiques agroécologiques » (INRAE, 2017).

Les fermes maraichères biologiques permettent de répondre au critère de santé humaine car leur production de légumes biologiques permet un apport diversifié de végétaux sains dans notre assiette. C'est une production essentielle pour troquer nos régimes occidentaux très carnés et néfastes pour nos santés pour des régimes plus sains basés sur la consommation de végétaux principalement (Willet et al., 2019).

Quant aux micro-fermes maraichères biologiques de proximité, elles permettent aussi de répondre au critère de santé environnementale pour plusieurs raisons. La première est leur faible impact sur le climat. En effet, l'utilisation réduite d'intrants de synthèse, très énergivores pour leur production, une motorisation réduite du fait de la culture sur une surface réduite et la réduction des distances de transport par la commercialisation en circuits courts, permettent de drastiquement réduire les émissions de GES associées à cette forme d'agriculture.

Cela va aussi de pair avec une bonne efficacité énergétique. Les micro-fermes maraichères biologiques de proximité ont la capacité de reposer principalement sur les énergies écologiques et culturelles biologiques (Gliessman, 2015) à condition de mettre en place une bonne gestion de la fertilité du sol. Or, aujourd'hui, en période de raréfaction générale des ressources et dans une volonté de retour à la sobriété, réfléchir à l'agriculture par le prisme de l'efficacité énergétique est important. Comme nous l'a appris le cours de Marjolein Visser « Agroécosystèmes et Systèmes agraires », il faut désormais savoir contrebalancer le rendement biophysique des cultures par les dépenses énergétiques associées ainsi que par les répercussions sur l'environnement de certaines pratiques (Visser, 2022).

Puis, les micro-fermes maraichères biologiques avec des cultures d'espèces très diversifiées et la création d'hétérogénéité spatiale, permettent d'abriter une grande biodiversité fonctionnelle, essentielle pour une résilience face aux perturbations liées au climat.

De plus, comme nous l'a appris le cours « Recherche et développement en agroécologie », module « Agricultures urbaines et agroécologie urbaine », de Nicolas Vereecken, la pratique du maraichage péri-urbain ou urbain, permet de « créer du lien social » et « une reconnexion des humains à leurs environnements ». Le dernier rapport du GIEC préconise d'ailleurs l'agriculture urbaine comme une option d'adaptation efficace face au changement climatique (GIEC, 2023). Il faut donc soutenir les initiatives d'installation de fermes maraichères en péri-urbain ou urbain.

En sachant qu'on va devoir apprendre à entretenir une relation de sobriété avec les énergies fossiles, il semble alors compréhensible qu'il faille revoir les échelles de production agricole, notre rapport à la motorisation et ainsi favoriser une repaysannisation de nos sociétés dans une perspective de résilience alimentaire.

Pour conclure, à travers sa capacité à répondre au double critère de santé humaine et environnementale et au vu des enjeux de résilience alimentaire, le maraichage présente de nombreux arguments pour être maintenu et développé dans un contexte de changement climatique.

Le maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau

Cette prochaine partie permet désormais de présenter le cadre dans lequel j'ai réalisé mon travail de TFE et comment a été construite ma question de recherche sur l'interface changement climatique et maraichage à travers le prisme de la raréfaction de l'eau.

Cadre de travail : le projet Climaleg-eau

Mon travail de fin d'études a été nourri par un stage réalisé au sein des UMR Ecosys et Sadapt de l'INRAE, à Palaiseau. J'ai participé lors de ce stage au projet ClimaLeg-Eau qui est la suite du projet ClimaLeg.

Les dernières années, le maraichage péri-urbain en Ile-de-France est en grande expansion du fait d'une forte demande alimentaire en produits locaux par les collectivités ainsi qu'un développement de nouvelles formes de productions plus diversifiées et à échelle plus réduites. Sur le plateau de Saclay, cette expansion est soutenue par des politiques de résilience alimentaire grâce au travail de l'association Terre et Cité comme structure porteuse du programme européen Leader depuis 2015 (Terre et cité, 2023) ou coordinatrice du Projets Alimentaires Territoriaux (PAT) existant depuis 2017 (Terre et cité, 2023).

C'est donc dans ce contexte que l'INRAE a obtenu un financement Leader pour initier en 2021 le projet ClimaLeg qui avait pour objectif de « modéliser l'impact du changement climatique sur les productions légumières » à l'horizon 2060 en Île-de-France (Touili, 2023). Ce projet a été mené en recherche-participative avec des maraicher·ères en agriculture conventionnelle et biologique sur trois sites franciliens au niveau du plateau de Saclay (91), de la plaine de Cergy (95) et du Mée-sur-Seine (77) (Touili, 2023).

À la suite de deux ateliers avec les maraicher·ères et le traitement de formulaires en ligne, les chercheur·euses ont pu établir avec les agriculteur·trices les priorités d'adaptation. Il en ressort que la question prioritaire concerne la ressource en eau. Il existe une demande de la part des maraicher·ères interrogé·es à connaître comment le changement climatique va impacter les besoins en eau d'irrigation de leurs cultures à l'horizon 2060. Dans ce cadre-là, débute alors en 2022 le projet ClimatLegEau auquel je me suis greffée. Il est porté par Christine Aubry et Nabil Touili de l'UMR Sadapt et Erwan Personne de l'UMR Ecosys. L'objectif de celui-ci est « d'évaluer les besoins supplémentaires en eau des systèmes légumiers et maraichers franciliens sous l'influence des impacts futurs du changement climatique » (Touili, 2022).

C'est donc la participation à ce projet qui m'a permis de cadrer mon travail sur l'interface entre le changement climatique et le maraichage à travers le prisme de la raréfaction de la ressource en eau. La prochaine partie a pour objectif de clarifier l'utilisation de l'eau dans le maraichage et de définir le terme de raréfaction de l'eau.

Le maraichage et la raréfaction de l'eau

Le maraichage utilise de l'eau principalement pour l'irrigation de ses cultures en plein champ et sous serre et une moindre partie de l'eau est utilisée pour le lavage des légumes et autres activités diverses. Que ce soit l'eau issue de précipitations ou l'eau d'irrigation, cette ressource est essentielle pour la croissance des plantes

maraichères. Pour que perdure le maraichage dans un contexte de changement climatique avec une hausse des températures atmosphériques, une forte modulation saisonnière des précipitations ainsi que de sécheresses édaphiques consécutives, il est donc important d'estimer l'évolution des besoins en irrigation.

La source de l'eau peut être diverse sur les fermes maraichères. Dans le nord de la France et en région parisienne, dans la plupart des cas, l'eau est prélevée dans la nappe souterraine grâce à un forage et une pompe. Pour les maraichères travaillant à proximité d'un cours d'eau, l'eau peut y être prélevée mais cette situation est plus rare (Escaffre, 2023). Enfin, certain·e·s maraichères utilisent l'eau de ville dans des cas exceptionnels : la plupart du temps lors de l'installation quand il n'existe pas d'accès à l'eau d'un forage ou d'un cours d'eau. Utiliser l'eau de ville comme source pour l'irrigation est très onéreux et est évité dans la plupart des cas.

Les dernières années, sous l'effet du changement climatique, la demande d'eau a augmenté dans le secteur agricole. Une pression de plus en plus forte se fait ressentir sur une ressource qui reste limitée et qu'il faut préserver. La raréfaction, d'un point de vue économique, se définit donc comme l'augmentation de la demande pour une offre qui stagne ou faiblit. Dans notre cas, la raréfaction est aussi cadrée par la réglementation et sa pratique. Par exemple, la réglementation prévoit la demande d'autorisations de forage pour l'installation des nouvelles fermes mais les dernières années, les autorisations se font plus difficiles à obtenir pour le maraichage en Ile-de-France entravant l'accès à l'eau. Dans la littérature, certain·ne·s définissent que lorsque l'accès agricole à l'eau dépend de multiples facteurs, sociaux, d'infrastructures, et économiques, il serait plus juste de qualifier cette situation de « pauvreté hydrique agricole » (Forouzani et al., 2013). Par souci d'allègement du texte, dans ce rapport, le terme « raréfaction » est employé mais cet usage n'exclut par le caractère multidimensionnel conditionnant la demande et l'offre en eau.

Présentation de la question de recherche

En France, depuis la loi sur l'eau de 1992, l'eau souterraine est culturellement considérée comme un bien commun en France car définie comme « un héritage commun de la nation » (Rouillard et al., 2021). La réglementation mise en place reconnaît donc l'eau comme un bien non excluable et rival. Pourtant, la grande pression qui s'exerce sur cette ressource dans le milieu agricole fait tendre à la privatisation par certain·ne·s en dérogeant à la règle. Ainsi à l'heure où la pression pour avoir accès à l'eau amène à des véritables batailles physiques autour des méga-bassines de Sainte-Soline, il est important de s'interroger sur les leviers à mettre en place pour soutenir le maraichage dans ce contexte brûlant de la raréfaction de l'eau. Le maintien du maraichage, comme nous l'avons vu précédemment, est pertinent dans un contexte de changement climatique.

La question principale de recherche de ce travail s'intitule donc comme suit : « Comment faire perdurer le maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau sous l'impact du changement climatique ? ». C'est une problématique large car elle touche à un problème global qu'est le changement climatique. En quatre mois de travail, je n'ai pas la prétention d'y répondre de manière complète, sans angles morts. Voici tout de même mes

axes de travail. J'ai décomposé cette problématique en deux questions subsidiaires. A la première, j'apporte une réponse tandis qu'à la seconde, j'ouvre des perspectives.

Axe 1 : Comment vont évoluer les besoins en irrigation du maraichage sous l'impact du changement climatique sur le plateau de Saclay ?

Tout d'abord, s'intéresser au maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau revient à s'intéresser à l'impact que le changement climatique va avoir sur les besoins en irrigation des cultures maraichères. Il est alors important de connaître comment vont évoluer ces besoins. La thèse émise par les chercheurs travaillant pour ClimaLeg-eau est que ceux-ci vont augmenter sous l'effet de l'augmentation de l'évapotranspiration. Le travail que j'ai produit permet de confirmer cette thèse et a pour objectif de répondre à la question : « Comment vont évoluer les besoins en irrigation du maraichage sous l'impact du changement climatique à l'horizon 2060 ? ».

Le travail réalisé s'appuie sur le cas d'étude du plateau de Saclay où onze agriculteur·trices pratiquent le maraichage soit de manière exclusive soit en combinaison avec d'autres cultures dont une majorité le pratique en agriculture biologique. La particularité de ce territoire est que le canal de commercialisation privilégié du maraichage est la vente directe à la ferme ou bien, la participation à une Association pour le maintien d'une agriculture paysanne (AMAP). Le travail produit a pour objectif d'anticiper comment leurs besoins en irrigation peuvent augmenter sous l'effet du changement climatique à l'échelle de leur vie, d'ici 2060. Les bénéficiaires finale·aux de ce travail sont donc les maraicher·ères du plateau de Saclay.

Les résultats produits sont ainsi spécifiques au plateau de Saclay. La démarche de connaître l'impact du changement climatique sur les besoins en irrigation du maraichage à l'horizon 2060 semble néanmoins pertinente de manière générale pour aborder cette grande question « Comment faire perdurer le maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau sous l'impact du changement climatique ? ».

Dans la suite du rapport, la partie « Méthodes » présente le modèle que j'ai développé pour faire ces estimations. En quelques mots, le modèle développé est un modèle de bilan hydrique qui utilise des données climatiques journalières projetées jusqu'à 2060, produites par l'unité AgroClim de l'INRAE grâce aux RCP du GIEC. Ce modèle permet le calcul des besoins optimaux en eau d'irrigation pour les cultures maraichères en plein champ.

Dans le champ de la recherche, le travail réalisé est plutôt novateur car ce genre de données n'a jamais été produit pour le maraichage en Ile-de-France et en France. La modélisation de l'évapotranspiration par un double coefficient est une méthode très bien décrite par la FAO et celle-ci est largement utilisée dans le monde scientifique pour le calcul précis de bilan hydrique tandis que l'utilisation de matériel tel que des données climatiques projetées grâce aux RCP est également très répandue dans deux nombreux domaines. Le caractère novateur de ce travail réside dans l'utilisation conjointe de cette méthode et ce matériel appliqué au maraichage

en France, pour décrire les tendances des besoins en irrigation dans le futur. Il existe des travaux scientifiques utilisant la même démarche que celle employée dans ce travail mais dans des régions du monde plutôt arides et concernant d'autres cultures.

Ainsi, la partie « Méthodes » du rapport présente comment a été développé le modèle permettant d'estimer les besoins en irrigation du maraîchage sous l'effet du changement climatique, sur quoi il s'appuie. Sont aussi présentées les différentes fonctions du modèle et l'utilisation qui en a été faite dans le cadre de ce travail.

Enfin, la partie « Résultats et analyse » présente les résultats des simulations, une prise de recul par rapport à ces résultats par corroboration et puis, une interprétation de ces résultats.

Axe 2 : Et après ?

Puis, ce premier travail est complété dans la partie « Discussion ». Cette partie a été construite avec l'intention de répondre à la problématique de manière systémique car le problème du changement climatique l'est. Elle aborde les questions d'adaptation des fermes maraichères, du partage des risques liés au climat et dresse des perspectives afin que la gestion de l'eau à l'échelle des territoires soit équitable et durable. Ces réflexions se sont construites au cours du stage grâce à des discussions, enquêtes et diverses lectures.

II. Matériel et méthodes

L'objectif de cette partie du rapport est de décrire la méthode mise en place pour obtenir l'estimation des besoins futurs en irrigation pour le maraichage sur le plateau de Saclay. La méthode repose sur la modélisation d'un bilan hydrique qui est simulé avec des données climatiques prospectives s'alignant sur différents scénarios de changement climatique produits par le GIEC. Cette partie « Matériel et méthodes » se décline en différentes sous-parties explicatives : définition d'un bilan hydrique, explication du développement du modèle, présentation du modèle développé, présentation de la paramétrisation et des simulations réalisées.

Définition d'un bilan hydrique

Le bilan hydrique est une méthode conceptuellement simple qui permet de suivre l'état de la réserve en eau du sol disponible pour une culture ou plante donnée. Le bilan hydrique permet d'évaluer si les entrées en eau compensent les sorties en eau. Ci-dessous voici un schéma d'un bilan hydrique :

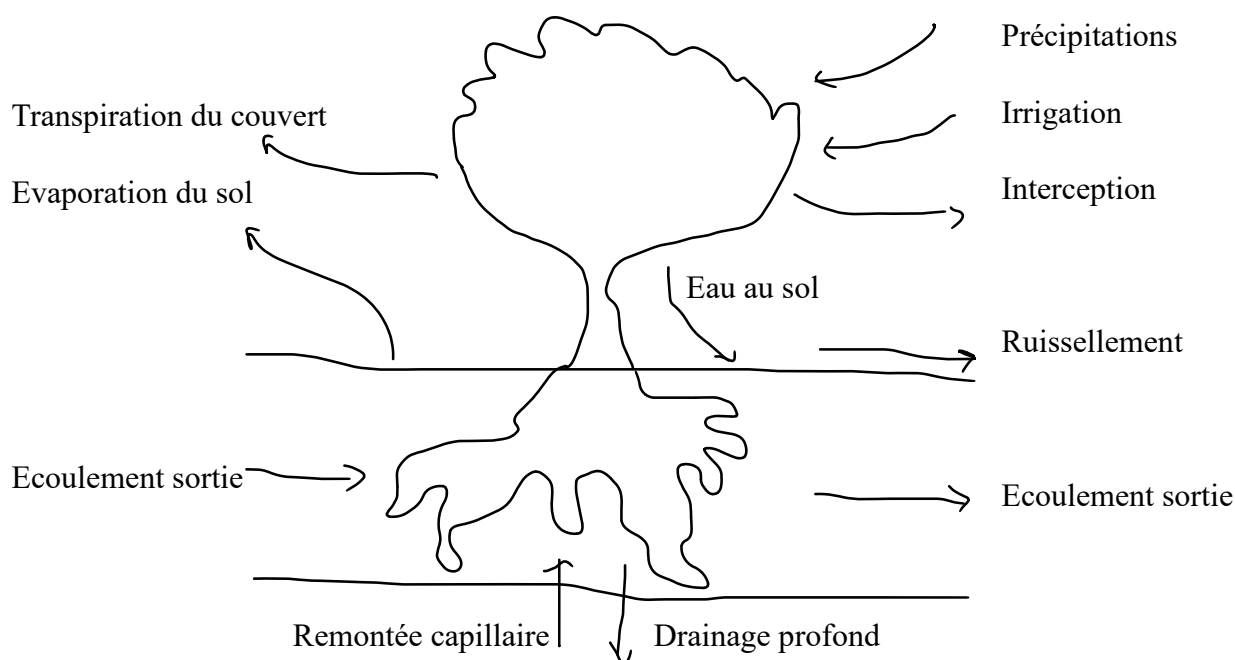


Figure 1 : schéma d'un bilan hydrique

Les entrées du bilan hydrique sont :

- les précipitations ;
- l'eau d'irrigation si la culture est irriguée ;
- l'eau d'écoulement ;
- l'eau qui remonte par capillarité.

Les sorties du bilan hydrique sont :

- l'interception des précipitations et/ou eau d'irrigation par le feuillage ;
- la consommation en eau de la plante à travers la transpiration ;
- l'évaporation en eau de la couche supérieure du sol ;
- le ruissellement si le sol n'est plus en mesure de d'absorber l'eau et que le sol est en pente ;
- la perte par drainage profond vers les aquifères sous-terrain ;
- l'eau d'écoulement.

Généralement, ces données sont exprimées en millimètres, un millimètre correspondant à 1 litre par mètre carré soit encore 10 mètres cube par hectare. De plus, souvent sont regroupées sous un terme commun la transpiration de la plante et l'évaporation du sol : l'évapotranspiration.

Toutes ces entrées et sorties jouent sur la réserve utile (RU) en eau du sol aussi exprimée en millimètres. La RU est définie comme la « quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme » (Doussan et al., 2017).

La réserve utile est définie comme suit :

$$RU = Z_r * (\theta_{cc} - \theta_{fp})$$

Avec :

- RU [mm] : réserve utile ;
- θ_{cc} : l'humidité volumique à la capacité au champ soit « la teneur en eau du sol après que l'eau « excédentaire » se soit évacuée par gravité et que le drainage soit « négligeable » (2-3 jours après une pluie) » (Doussan et al., 2017) qui dépend de la nature du sol (sableux, limoneux, argileux) ainsi que du travail du sol ;
- θ_{fp} : l'humidité volumique au point de flétrissement permanent soit « la teneur en eau du sol à partir de laquelle la plante ne peut plus récupérer du flétrissement même après passage dans une atmosphère humide » (Doussan et al., 2017) qui dépend de l'interaction sol-plante ;
- Z_r [mm] : la profondeur d'enracinement maximale de la plante.

La réserve utile se distingue en deux réserves qui dépendent de la qualité de l'enracinement de la plante, celle dite réserve facilement utilisable (RFU) et celle dite réserve difficilement utilisable (RDU). Généralement, la RFU est une fraction de la RU et est égale à 2/3 de la RU pour une plante très bien enracinée, 1/2 de la RU pour une moyennement enracinée, 1/3 de la RU pour une moins bien enracinée (Delaunoy et al., 2014). La plante est considérée comme étant en stress hydrique lorsqu'elle doit prélever dans la RDU.

Le bilan hydrique permet de faire état de la réserve utile et de juger selon son remplissage si l'eau présente dans le sol répond aux besoins de la plante. Dans notre cas, on définit donc que connaître les besoins en irrigation optimaux, c'est connaître les besoins en eau qu'il faut apporter en plus de l'apport des précipitations afin que la plante ne rentre pas en stress hydrique et n'ait pas à utiliser l'eau de la RDU.

Le développement du modèle

Le modèle développé s'appuie sur cet outil du bilan hydrique. Cette partie du rapport vise à expliquer comment a été conçu le modèle. Tout d'abord, les hypothèses de simplification concernant le bilan hydrique sont posées, puis il est expliqué quels étaient les données climatiques disponibles pour le développement du modèle, comment est calculée de l'évapotranspiration et quelle technologie est utilisée.

Hypothèses sur le bilan hydrique

Par rapport au bilan hydrique présenté ci-dessus, plusieurs hypothèses de travail ont été faites. Tout d'abord, l'interception par le feuillage est négligée car les cultures maraichères sont relativement proches du sol et présentent un indice de surface foliaire plutôt faible. Ensuite, le ruissellement est négligé du fait de la topographie plane du plateau de Saclay, de même que l'écoulement. Ainsi, l'eau au sol est équivalent à l'eau des précipitations dans la mesure de la capacité au champ, à celle-ci peut venir s'ajouter l'eau d'irrigation. Concernant le drainage profond et la remontée par capillarité, ceux-ci ont aussi été négligés car ils sont difficiles à estimer (FAO, 1998).

Voici donc comment s'exprime dynamiquement la réserve utile sous ces hypothèses :

$$RU_t = RU_{t-1} + Précipitations (+Irrigation) - Evaporation - Transpiration$$

Avec :

- RU_t [mm] : la réserve utile à l'instant t ;
- RU_{t-1} [mm] : la réserve utile à l'instant t-1 ;
- Précipitations [mm] : la somme des précipitations solides et liquides ;
- Irrigation [mm] : l'apport d'eau d'irrigation ;
- Evaporation [mm] : la fraction d'eau du sol évaporée ;
- Transpiration [mm] : la fraction d'eau transpirée par la plante.

Dans notre cas, l'échelle temporelle considérée est journalière. Ainsi, la réserve utile est actualisée tous les jours selon les précipitations, l'évaporation et la transpiration du jour. Par soucis de simplification, il est considéré que les précipitations qui atteignent le sol, pénètrent aussi le sol le jour même dans la mesure de la capacité au champ. Quant aux besoins en irrigation, ils sont comptabilisés lorsque la réserve utile atteint le seuil de RDU et ils sont calculés de telle sorte à que la réserve utile réatteigne son niveau d'humidité à la capacité au champ.

Le développement du modèle et notamment le calcul de l'évapotranspiration ont été déterminés par les données climatiques Siclima mises à disposition. La prochaine partie présente ces données.

Les données climatiques Siclima

Les données climatiques utilisées pour le modèle sont issues d'un Système d'information de données climatiques maillées (Siclima) développé par l'équipe AgroClim de l'INRAE.

Elles se distinguent en deux parties selon si les données sont passées ou prospectives du futur et recouvrent au total la période de 1960-2060. Les données du passé reposent sur le modèle climatique SAFRAN et sont réactualisées en continu par Météo-France. Les données futures se basent sur la DRIAS-2020, le modèle CNRM-CM5/ALADIN 63 et sont disponibles pour différents scénarios climatiques : RCP 4.5 et RCP 8.5.

Les données sont générées par « mailles » soit des délimitations géographiques carrées de 8 kilomètres par 8 kilomètres. Dans notre cas, 12 mailles sont considérées pour une zone péri-urbaine à l'ouest de Paris, incluant le plateau de Saclay. Pour chacune de ces mailles, sont fournies de manière journalière par Siclima :

- la date ;
- les températures minimales, maximales, moyennes [°C] ;
- l'humidité relative de l'atmosphère [%] ;
- les précipitations totales [mm] ;
- la vitesse du vent à 10m [m/s] ;
- l'évapotranspiration potentielle calculée par Siclima [mm].

Le calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration peut se présenter sous différentes formes : l'évapotranspiration potentielle (ETP), maximale (ETM) et réelle (ETR). L'ETP est une référence fournie pour un gazon bien alimenté en eau et pour un végétal sain. C'est la donnée qui est fournie par Siclima. L'ETR peut être mesurée et l'ETM peut être calculée pour différents végétaux à partir de l'ETP. Le modèle développé calcule l'ETM à partir de l'ETP afin de pouvoir faire le bilan hydrique.

Ce calcul de l'ETM peut être effectué de différentes manières. La plus simple est de considérer un coefficient de culture K_c comme facteur multiplicateur de l'ETP. Ce coefficient K_c varie selon le stade de croissance de la plante faisant varier l'ETM. Les coefficients K_c sont connus pour les différentes cultures. Ce calcul est celui généralement pratiqué par les chambres d'agricultures pour estimer l'ETM. Dans le cas de travaux de recherche scientifique, il est préconisé par la FAO de calculer différemment l'ETM afin que le calcul soit plus précis et fiable, à condition que l'on ait accès à des données climatiques journalières. La méthode préconisée s'appuie sur le calcul de deux coefficients distincts pour la transpiration, K_{cb} , et l'évaporation, K_e , aboutissant à l'équation suivante pour le calcul de l'ETM :

$$ETM = (K_e + K_{cb}) * ETP$$

Avec :

- ETM [mm] : l'évapotranspiration maximale ;
- K_e : coefficient d'évaporation du sol ;
- K_{cb} : coefficient de transpiration de la culture ;
- ETP [mm] : l'évapotranspiration potentielle.

Le calcul de l'ETM avec ce coefficient double repose sur différentes étapes :

- sélection des longueurs de stade de croissance des cultures :
 - L_{ini} : nombre de jours pour le stade initial de développement de la plante ;
 - L_{dev} : nombre de jours pour le stade de croissance de développement de la plante ;
 - L_{mid} : nombre de jours pour le stade intermédiaire de développement de la plante ;
 - L_{late} : nombre de jours pour le stade final de développement de la plante.
- sélection des valeurs du coefficient de transpiration :
 - K_{cbini} : valeur du K_{cb} pour le stade initial de développement de la plante ;
 - K_{cbmid} : valeur du K_{cb} pour le stade intermédiaire de développement de la plante ;
 - K_{cbend} : valeur du K_{cb} pour le stade final de développement de la plante.
- ajustement aux conditions locales climatiques des valeurs de K_{cbmid} et K_{cbend} ;
- construction de la courbe de K_{cb} dans le temps ;
- détermination des valeurs quotidiennes de K_e pour la surface d'évaporation ;
- addition des deux coefficients K_{cb} et K_e puis calcul de l'ETM.

Ces différentes étapes du calcul sont expliquées dans la partie B, chapitre 7 (p135-157) du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 ». Le modèle a été développé en suivant ces étapes de calcul.

Technologie utilisée

Les fichiers de données climatiques étant sous le format .csv, la manipulation des données sous Excel était facilitée. Le modèle de bilan hydrique a donc été développé sur Excel sous fichier .xlsm supportant les macros et la création de fonctions VBA. Le modèle repose aussi sur des tableaux croisés dynamiques (TCD).

Le modèle développé

Cette partie permet de décrire le modèle développé et ses fonctions, puis de présenter les données utilisées pour les simulations effectuées dans le cadre de ce travail.

Description et fonctions

Finalement, le modèle développé de bilan hydrique a pour fonction de calculer les besoins optimaux en eau d'irrigation pour des cultures maraichères en plein champ selon l'évolution de la réserve utile en eau du sol en prenant en compte comme entrée les précipitations prévues par Siclima et comme sortie l'ETM calculée.

Le modèle n'intègre donc pas la prise en compte de stress hydrique car il a pour fonction de connaître les besoins en irrigation optimaux. Le modèle a été conçu pour être entièrement paramétrable concernant 3 groupes de paramètres d'entrée :

- les données Siclima peuvent être modifiées pour simuler une autre maille géographique ou utiliser un autre scénario de changement climatique ;
- le type de sol peut être modifié ;
- les cultures maraichères simulées peuvent être modifiées en passant par différentes configurations s'étayant de :
 - la moins complexe : une culture par an répétée chaque année ;
 - la plus complexe : une rotation de cultures sur 2 années qui se répète cycliquement dans le temps avec un maximum de 5 cultures successives par années.

Enfin, le modèle se distingue en trois fichiers .xlsm qui se rapportent aux situations suivantes :

- le sol est nu outre les cultures ;
- un bâchage plastique est appliqué sur le sol ;
- un paillage organique est appliqué sur le sol.

Les modélisations de bâchage et paillage sont détaillées dans la partie C, chapitre 10 (p195-198) du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 ». Dans les deux cas, il a été considéré que le sol était couvert à 75%.

Un tutoriel détaillé pour l'utilisation du modèle est disponible en annexe 1.

Les données des simulations

Climatiques

Les données climatiques utilisées sont celles issues de Siclima pour le RCP 4.5 et pour les mailles Safran numéro 1679 (passé) et la maille correspondante Drias-2020 numéro 14367 (futur). Ce qui est simulé correspond donc à la maille du plateau de Saclay la plus à proximité du campus Agro de Saclay (voir ci-dessous).

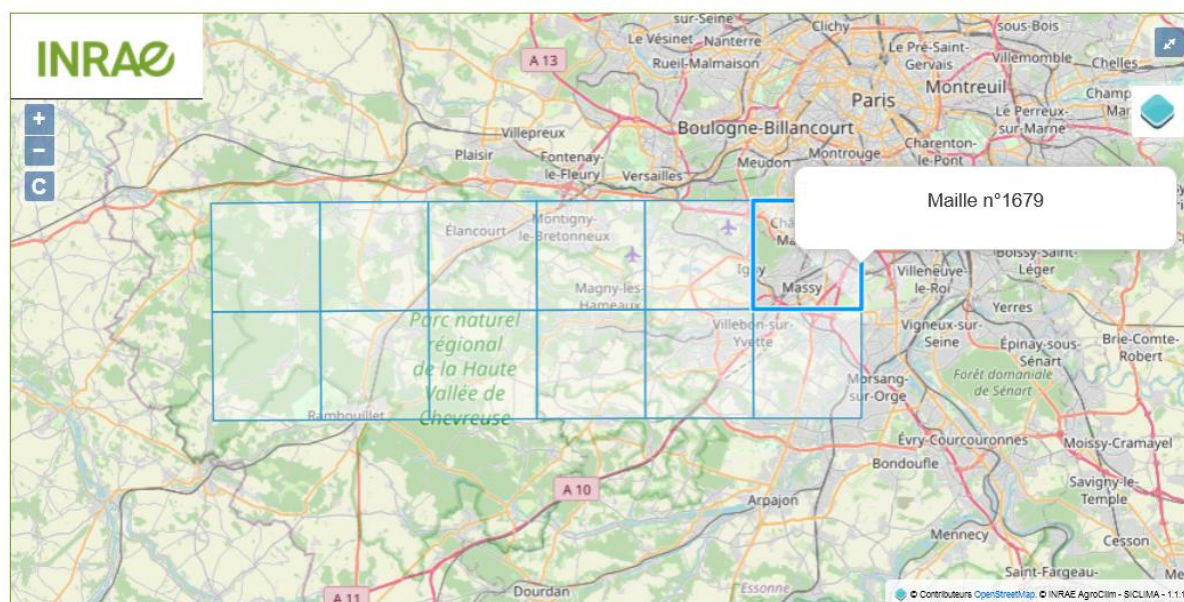


Figure 2 : localisation géographique de la maille 1679, image extraite de Siclima

Pédologiques

Le type de sol simulé est un sol limoneux car d'après les enquêtes de terrain auprès des maraichères du plateau de Saclay, leurs sols sont principalement limoneux et le limon est la caractéristique commune à tous leurs sols malgré des pourcentages variables en sable ou argile. Ces données sont disponibles dans la table 19 (page 144) du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 ».

Le pourcentage de RU représentant la RFU a été déterminé pour chaque culture grâce à la table 22 (page 163) du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 ». Généralement pour les cultures considérées, la portion de RFU varie entre 30 et 45% de la RU.

Culturales

Puis, il a fallu faire un choix dans les cultures et successions simulées et trouver les données correspondantes.

Tout d'abord, il a été choisi de simuler 5 cultures indépendantes : l'aubergine, la carotte, la courgette, la tomate, la laitue. Le critère de choix de 5 cultures fut qu'elles sont communes à la plupart des fermes maraichères et/ou rémunératrices. Les dates de cultures ont été sélectionnées pour correspondre à la réalité du plateau de Saclay. Dans le cas de la laitue, qui peut être cultivée quasiment toute l'année, la plage de culture a été choisie

pour correspondre aux besoins en irrigation les plus forts, soit à travers une culture d'été. Voici donc les plages temporelles considérées pour chaque culture :

- Aubergine : du 15 mai au 27 septembre ;
- Carotte : du 1er mars au 29 juin ;
- Courgette : du 15 mai au 27 septembre ;
- Laitue : du 1 juin au 6 juillet ;
- Tomate : du 15 mai au 12 septembre.

Puis, deux successions « typiques » du maraîchage du plateau de Saclay ont été construites avec Christine

Succession type 1						
Année 1	Laitue		Tomate		Radis	
	01 mars	30 avril	15 mai	30 septembre	01 octobre	10 novembre

Tableau 1 : nature de la succession de cultures type 1

Succession type 2						
Année 1	Laitue		Laitue		Poireau	
	01 mars	30 avril	05 mai	04 juillet	10 juillet	07 décembre
Année 2	Laitue		Radis		Carotte	
	01 mars	30 avril	01 mai	31 mai	01 juin	28 novembre

Tableau 2 : nature de la succession de cultures type 2

Pour la simulation des cultures ou successions de cultures, que ce soient les dates de semis et récolte, la longueur des différents stades de croissance ou bien, la hauteur de la plante et sa profondeur de développement racinaire, toutes ces informations ont été déterminées grâce à une récolte et croisement de données au préalable. Il était important que ces données soient les plus fiables possibles pour que le résultat des simulations le soit aussi. La détermination des paramètres a été possible grâce à ces différentes sources d'informations :

- fournies par Pénélope Montagnat Misson, conseillère technique en maraîchage biologique à la chambre d'agriculture de la région Ile-de-France ;
- fournies par Antoine Tardif, employé de l'INRAE, possédant des connaissances sur les stades de croissance des cultures maraichères ;

- issues de documentation technique de maraichage (Argouarc'h, 2005 ; Chambre d'agriculture de Région Ile-de-France, 2019) ;
- issues du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 » ;
- issues des enquêtes de terrain réalisées par Christine Aubry et Nabil Touili auprès des maraichères dans le cadre du projet ClimaLeg-Eau.

En résumé

En résumé, le modèle a été construit sur Excel et il est entièrement paramétrable. Il repose sur des données climatiques Siclima projetées à l'horizon 2060 pour le plateau de Saclay ainsi que sur le calcul de l'évapotranspiration à travers un double coefficient. Cinq cultures indépendantes ont été simulées (l'aubergine, la carotte, la courgette, la tomate, la laitue) ainsi que deux successions de cultures typiques. Le modèle a pour fonction de fournir des estimations des évolutions des besoins en irrigation optimaux du maraichage en plein champ à l'horizon 2060 sur sol nu, avec paillage organique ou bâchage plastique.

III. Résultats et analyse

Résultat des tests de sensibilité

Une fois le modèle développé, les premiers résultats des simulations étaient disponibles. Nous observons une tendance linéaire à la hausse dans les besoins en irrigation d'ici 2060 pour toutes les cultures simulées. Cette tendance linéaire peut être représentée comme telle, avec son ordonnée à l'origine et sa pente :

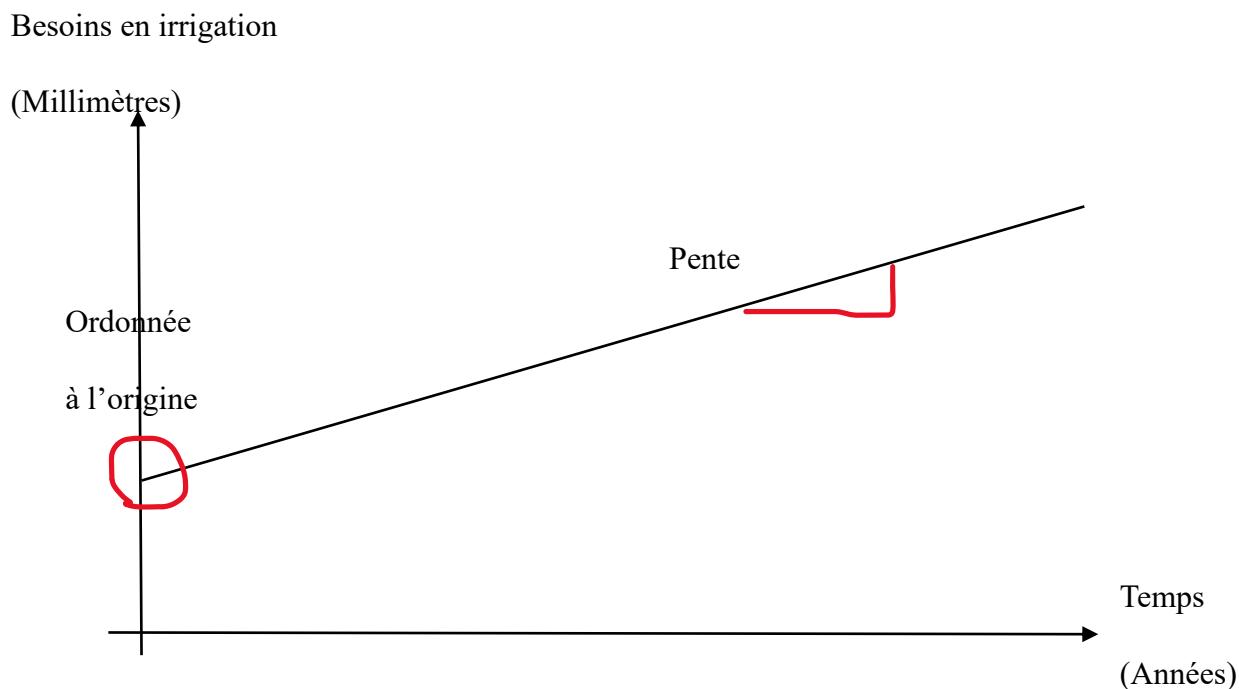


Figure 3 : modèle de courbe tendancielle des besoins en irrigation

Nous avons pu observer, sans surprise, que l'ordonnée à l'origine et la pente de la courbe tendancielle dépendaient de la nature de la culture et/ou succession de cultures.

Afin de prendre du recul sur ces résultats, une série de tests de sensibilité a été réalisée pour observer l'impact indépendant de différents paramètres sur la courbe de tendance des besoins en irrigation. Ont été testés indépendamment l'impact de maille géographique simulée, l'impact du RCP 4.5 ou RCP 8.5, l'impact de la profondeur d'enracinement des cultures et l'impact du seuil de la RFU. Voici les résultats représentés ci-dessous sur l'impact de ces paramètres sur l'ordonnée à l'origine et/ou la pente de la courbe de tendance des besoins en irrigation :

	Ordonnée à l'origine	Pente
Nature de la culture/ succession de culture	Oui +++	Oui +++
Maille géographique	Oui +	Oui ++
RCP	Non	Non
Profondeur d'enracinement	Oui +	Non
Seuil de la RFU	Oui +++	Non

Tableau 3 : impact de différents paramètres sur l'ordonnée à l'origine et/ou la pente de la courbe tendancielle des besoins en irrigation

L'intensité de l'influence du paramètre est représentée par « +++ » pour signifier un fort impact et « + » pour signifier un plus faible impact. L'échelle d'intensité repose sur une interprétation des résultats des tests de sensibilité. Ceux-ci sont présentés en annexes 2, 3, 4 et 5 du rapport. Les données fournies dans ces graphes en annexe sont à prendre avec du recul car la seule information valable à retenir est l'impact du paramètre testé. Les données brutes ne sont pas à prendre en compte telles quel car il n'existe aucune garantie que les autres paramètres étaient correctement paramétrés au moment des tests de sensibilité.

En quelques mots, les tests de sensibilité montrent qu'il existe une plus grande incertitude sur l'ordonnée à l'origine de la courbe puisqu'elle dépend fortement des paramètres caractérisant les cultures et du seuil de RFU considéré, puis, elle dépend dans une moindre mesure du choix de la maille géographique et des profondeurs d'enracinement considérées. Ensuite, la pente de la courbe dépend également fortement des paramètres caractérisant les cultures et dans une moindre mesure, du choix de la maille géographique. Un résultat assez surprenant de ces tests de sensibilité est que le choix du RCP 4.5 ou 8.5 ne semble pas affecter ni l'ordonnée à l'origine ni la pente de la courbe des tendances. Des différences sont observées dans la variabilité des besoins mais pas dans la courbe de tendance linéaire. Concernant, l'impact de la maille géographique sur la courbe des tendances, il a été établi que celui-ci est lié à des valeurs d'évapotranspiration potentielle calculées par Siclima très différentes d'une maille à l'autre, bien que les mailles considérées se situaient toutes dans la même région.

Faire ces tests de sensibilité a permis un choix attentionné des différents paramètres des simulations et ainsi une interprétation des résultats plus fiables. Voici dans la prochaine partie les résultats de l'évolution des besoins en irrigation à l'horizon 2060 sur le plateau de Saclay.

Les tendances des besoins en irrigation à l'horizon 2060

Par cultures

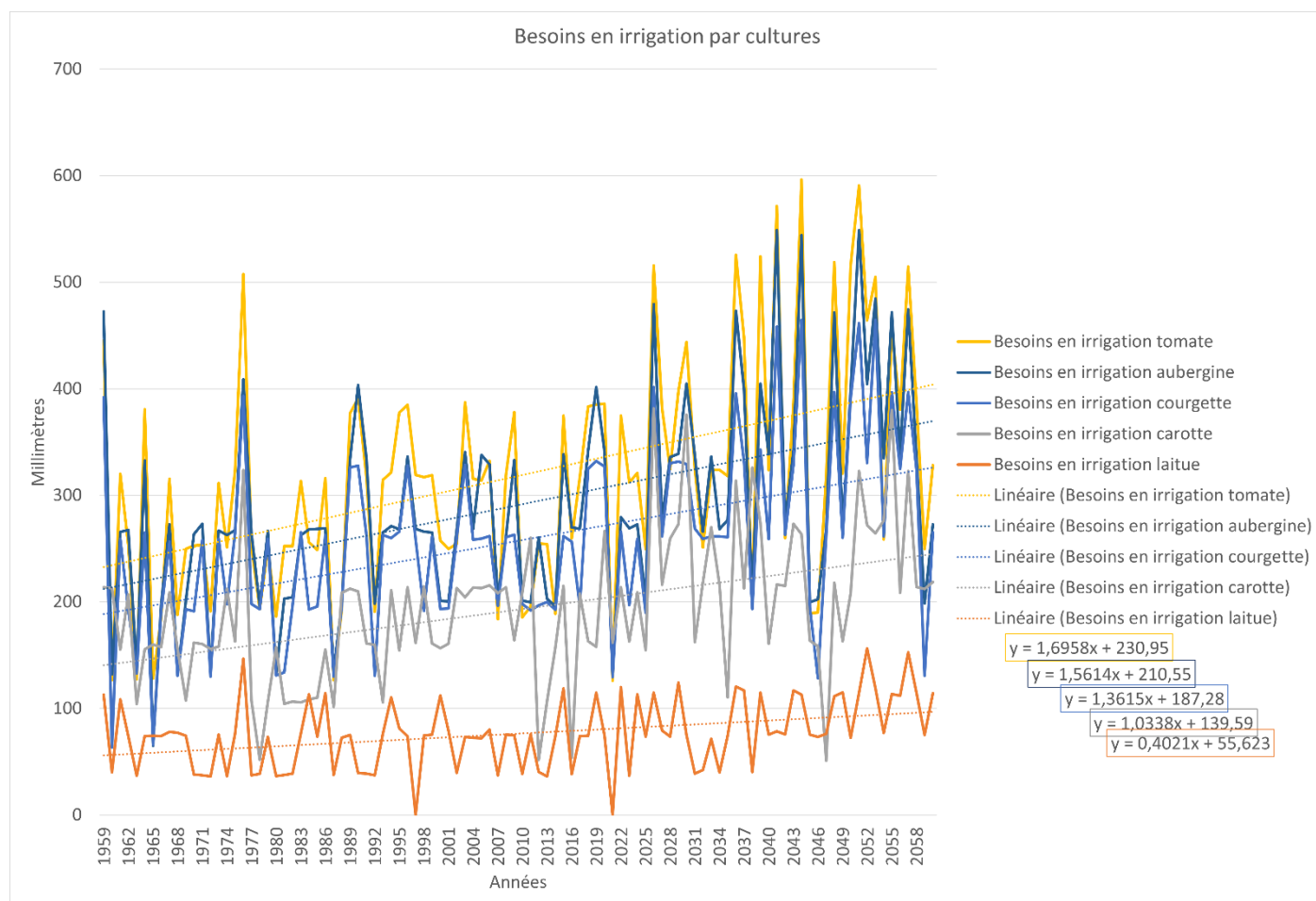


Figure 4 : évolution des besoins en irrigation de la tomate, aubergine, courgette, carotte, laitue entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay

Voici ci-dessus les résultats des évolutions des besoins en irrigation pour les cultures de la tomate, de l'aubergine, de la courgette, de la carotte et de la laitue sur la période 1960-2060 pour le plateau de Saclay.

D'une manière générale, cette figure présente une tendance à la hausse des besoins en irrigation pour toutes les cultures ainsi qu'une variabilité des besoins en irrigation d'une année sur l'autre qui augmente sur la seconde partie de siècle. La figure montre que l'ordonnée à l'origine et la pente des courbes de tendances sont fortement dépendantes des cultures simulées. Cela s'explique par les besoins spécifiques des cultures.

Une comparaison avec une étude du BRL des besoins en irrigation des cultures ont permis de valider les ordres de grandeur issus de la simulation du modèle. Cette étude présente les besoins en irrigation de cultures maraichères pour le climat de Montpellier. Nous pouvons tout d'abord constater que les besoins en irrigation issus du modèle pour les différentes cultures les uns par rapport aux autres se classent dans le même ordre que les besoins en irrigation établis par l'étude du BRL pour ces mêmes cultures (BRL, s.d.). Puis, une

comparaison des données brutes permet aussi de valider les ordres de grandeur trouvés. Voici ci-dessous un tableau comparatif :

Culture	Donnée Montpellier	Donnée Saclay 2023 extraite de la courbe tendancielle	Différence
Tomate	395 mm	340 mm	55 mm
Aubergine	358 mm	310 mm	48 mm
Courgette	299 mm	280 mm	19 mm
Carotte	287 mm	200 mm	87 mm
Laitue	157 mm	80 mm	77 mm

Tableau 4 : comparaison des besoins en irrigation calculés par le BRL et par le modèle

La différence entre les données n'est pas significative sur ces ordres de grandeur et peut s'expliquer par le climat plus chaud et sec de Montpellier que celui de Saclay ainsi que par des implantations temporelles des cultures légèrement différentes. Nous pouvons donc valider les ordres de grandeur obtenus par la simulation du modèle.

Une autre comparaison avec les données issues des enquêtes de terrain aurait été pertinente. Cependant, les consommations en eau d'irrigation par cultures et sur sol nu sont souvent méconnues par les maraîchers. Un seul maraîcher nous a fourni une estimation de la consommation d'une laitue, de 100 mm à 200 mm. Ainsi en croisant cela avec le résultat du modèle et la comparaison BRL, on peut estimer que les résultats pour la laitue sont légèrement sous-évalués.

Puis, en se concentrant sur la pente de la courbe tendancielle, nous remarquons que l'augmentation des besoins en irrigation se traduit par environ :

	Par an	Pour 50 ans	Pour 100 ans
Tomate	+ 1.7 mm	+ 85 mm	+ 170 mm
Aubergine	+ 1.6 mm	+ 80 mm	+ 160 mm
Courgette	+ 1.4 mm	+ 70 mm	+ 140 mm
Carotte	+ 1 mm	+ 50 mm	+ 100 mm
Laitue	+ 0.4 mm	+ 20 mm	+ 40 mm

Tableau 5 : augmentation des besoins en irrigation pour les cultures de la tomate, aubergine, courgette, carotte, laitue, prévus pour 1 an, sur 50 ans ou 100 ans

La tendance à la hausse des besoins en irrigation peut paraître négligeable sur une seule année cependant, au bout d'un demi-siècle ou siècle entier, l'augmentation est notable.

Pour résumé, quelque soient les cultures maraichères, leurs besoins en irrigation vont augmenter d'ici 2060. La variabilité de ces besoins va aussi augmenter, cela va demander un grand effort d'adaptation. Puis, le modèle semble produire des résultats fiables pour des simulation de cultures indépendantes ainsi il est possible de simuler avec confiance des successions de cultures typiques. En voici les résultats dans la prochaine partie.

Par successions de cultures typiques

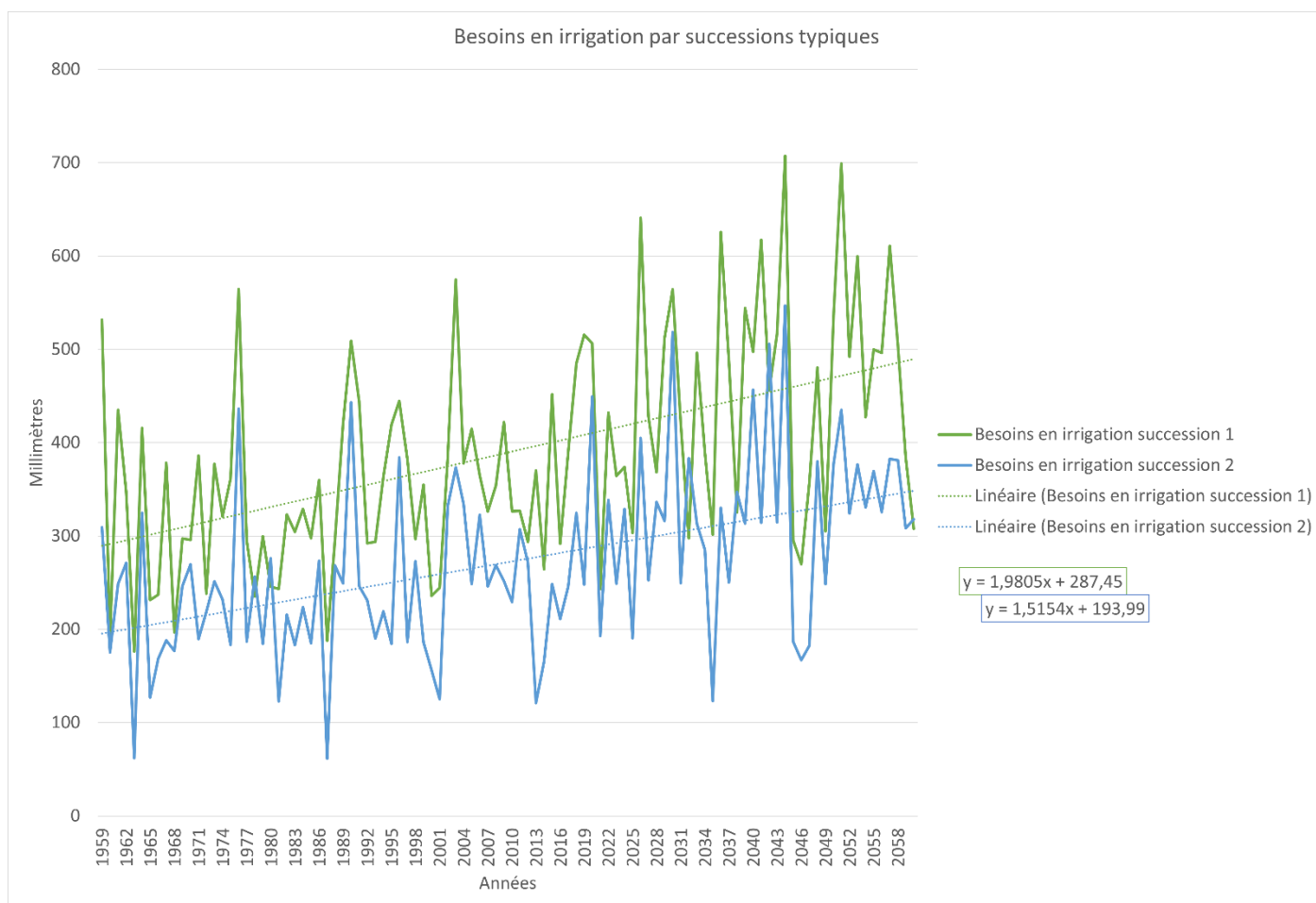


Figure 5 : évolution des besoins en irrigation des successions typiques 1 et 2 entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay

Pour rappel, le détail des successions typiques 1 et 2 est présenté dans la partie précédente « Matériel et méthodes ». Sur cette figure, de même que pour les cultures indépendantes, on retrouve une tendance à la hausse des besoins en irrigation de ces successions sur la période 1960-2060 ainsi qu'une variabilité plus forte sur la seconde moitié de siècle simulé. L'ordonnée à l'origine et la pente de la courbe des tendances sont différentes pour la succession 1 et 2 et le positionnement supérieur de la courbe correspondant à la succession 1 s'explique principalement car cette succession inclue la culture de la tomate qui présente des besoins en irrigation plus élevés que les autres cultures et une hausse plus marquée dans l'augmentation des besoins.

Les résultats présentés dans la figure ci-dessus sont importants car la simulation d'une succession de cultures, avec donc plusieurs cultures par années, peut représenter de manière simplifiée ce qu'il se passe à l'échelle d'une ferme maraîchère en plein champ si on imagine la multiplication sur l'espace de la ferme de cette succession. C'est une conception simplifiée car généralement une ferme maraîchère découpe sa SAU en différentes parcelles sur lesquelles sont cultivées les successions/rotations de culture. Ces rotations sont d'ailleurs souvent plus longues que 2 années comme représenté par la succession typique 2. Ainsi il faut prêter une attention particulière à la succession 1 : la considérer comme représentative d'une réalité maraîchère est exagéré car les fermes maraîchères ne cultivent généralement pas de la tomate sur toute leur SAU plein champ aux périodes mentionnées et ce, chaque année. Sachant que la tomate est une culture gourmande en eau, confirmé par les résultats précédents, la succession typique 1 présente des besoins en irrigation trop élevés pour associer ces résultats à la consommation globale en plein champ d'une ferme maraîchère. On peut donc uniquement utiliser la succession 2 comme représentation simplifiée de ce qu'il se passe à l'échelle d'une ferme maraîchère en plein champ. Celle-ci serait d'ailleurs une représentation basse des besoins en irrigation à l'échelle de la ferme car elle ne comporte pas de légumes dit « ratatouille », tomate, aubergine, courgette... gourmands en eau.

Enfin, si l'on considère que les consommations moyennes en irrigation à l'échelle d'une ferme en plein champ sont de 1500 m³/ha/an à 3000 m³/ha/an, on se rend compte que la courbe de tendance pour la succession 2 rentre dans cet intervalle sur la période 1960-2025 :

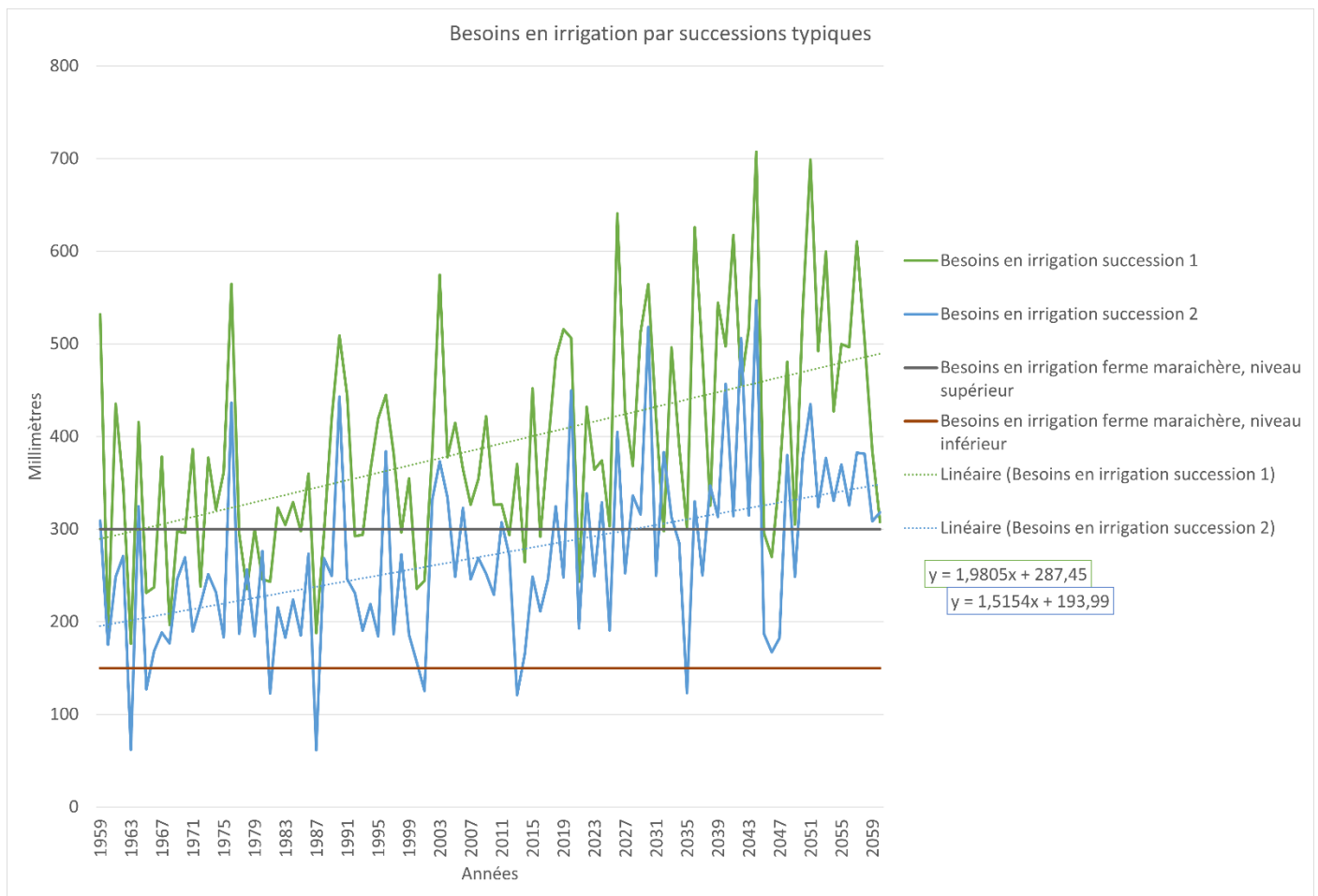


Figure 6 : évolution des besoins en irrigation des successions typiques 1 et 2 entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay et cadre consommations moyennes d'une ferme maraichère

Cela vient confirmer les ordres de grandeur trouvés et l'intention de considérer la succession 2 comme représentative à l'échelle de la ferme.

Quoiqu'il en soit, pour les successions simulées, on se rend compte que des besoins en irrigation de l'ordre de 200 à 300 mm en 1960 pourraient atteindre 350-500 mm en 2060. La différence est significative. Cela représente environ à l'échelle du siècle, pour la succession 1, une augmentation relative des besoins en irrigation de 75% de leur valeur. Quant à la succession 2, cela représente environ une augmentation relative de 67% des besoins en irrigation à l'échelle du siècle.

Si désormais on considère les besoins en irrigation de ces successions en 2060 par rapport à maintenant, on se rend compte que pour la succession 1, les besoins pourraient augmenter d'environ 20% d'ici 2060 tandis que pour la succession 2, de 17%. A considérer qu'on associe la succession 2 à une représentation basse des besoins en irrigation à l'échelle de la ferme en plein champ, **cela signifie que les besoins en irrigation pour les cultures en plein champ d'une ferme maraichère sur le plateau de Saclay pourraient augmenter à minima d'environ 17% d'ici 2060.** C'est une augmentation considérable étant donné qu'elle prend place sur moins de 40 ans.

L'impact du couvert du sol

La prochaine partie investigate l'impact d'un couvert de 75% de la superficie du sol par un bâchage plastique ou paillage organique sur les besoins en irrigation. Comme dit précédemment, la modélisation de ce couvert repose sur des préconisations issues de la partie C, chapitre 10 (p195-198) du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 » pour les coefficients cultureux doubles. La FAO mentionne que ces recommandations sont approximatives et elle recommande des observations et mesures locales si des estimations précises sont attendues. Ainsi, les résultats présentés ci-dessous n'ont pour fonction que de donner une idée approximative de l'impact du couvert sur les besoins en irrigation (FAO, 1998). Comme vu précédemment, la simulation la plus pertinente pour cette étude est celle de la succession 2 ainsi l'impact du couvert du sol est présenté sur cette succession. Voici ci-dessous le résultat :

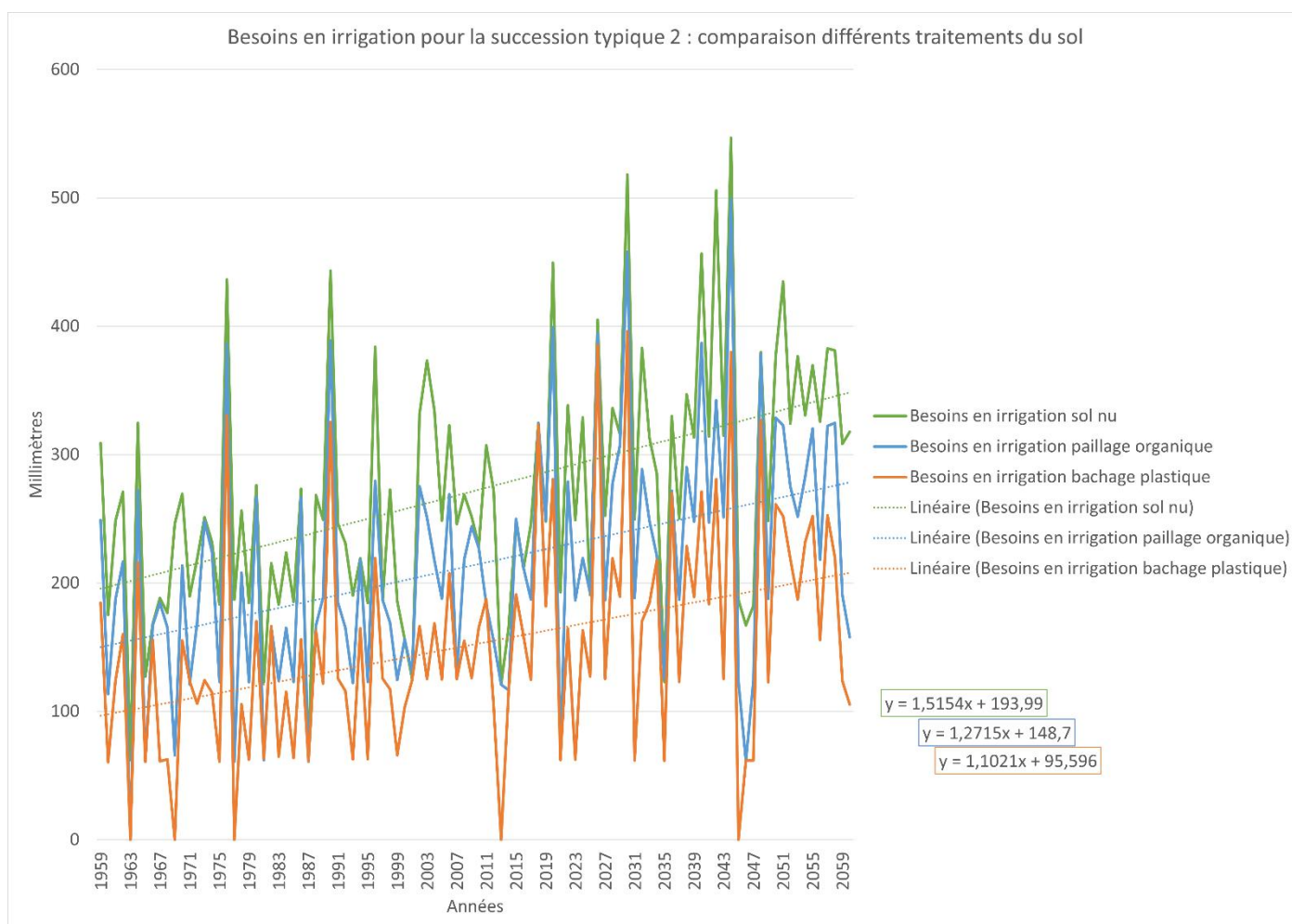


Figure 7 : évolution des besoins en irrigation de la succession typique 2 entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay, comparaison différents traitements du sol

Cette figure met en évidence que le couvert du sol semble avoir un impact à la fois sur l'ordonnée à l'origine ainsi que sur la pente des courbes tendanciennes. Ce résultat est intéressant car il indique que les besoins en irrigation sont réduits lorsque le sol est couvert mais également que la couverture du sol a un impact sur l'augmentation des besoins en irrigation sous l'effet du changement climatique.

Si l'on considère les besoins en irrigation projetés à 2060 sans couvert pour la succession 2, on peut remarquer qu'appliquer un paillage organique pourrait réduire de 22% de sa valeur les besoins en irrigation en 2060 tandis que le bâchage plastique pourrait réduire de 40% les besoins en irrigation en 2060. Dans les deux cas, le couvert du sol permet donc une économie d'eau significative. De plus, en considérant que la succession 2 représente l'échelle de la ferme, on peut donc en déduire que **l'utilisation d'une couverture recouvrant 75% de la surface du sol cultivé en plein champ pourrait réduire à minima de 22% les consommations en eau pour l'irrigation d'une ferme maraichère sur le Plateau de Saclay en 2060.**

Les résultats de la simulation présentent un plus fort impact du bâchage plastique que du paillage organique sur les besoins en irrigation. Pour rappel, ces résultats sont approximatifs et concernent les besoins en irrigation, ils sont donc à confronter d'une manière générale avec les avantages et inconvénients de ces deux pratiques. En aucun cas, cette étude prône l'utilisation du bâchage plastique de manière préférentielle sur le paillage organique, sans avoir au préalable peser le pour et le contre des deux techniques de couvert pour une situation spécifique.

Dans tous les cas, ces résultats présentent le couvert du sol comme une solution efficace pour réduire les besoins en irrigation du maraichage, grâce à la réduction significative de l'évaporation de l'eau du sol, voir annexe 6. On comprend en observant ces résultats pourquoi certaines agricultures comme l'agriculture de conservation ou certaines pratiques comme la permaculture préconisent de ne jamais laisser son sol à nu.

A retenir

Sur le plateau de Saclay, sous l'effet du changement climatique, les besoins en irrigation du maraichage présentent une tendance à la hausse qui est partagée par toutes les cultures, sur la période de 1960-2060. De plus, les besoins en irrigation pour les cultures plein champ d'une ferme maraichère pourraient augmenter à minima d'environ 17% d'ici 2060 par rapport au présent. Ensuite, l'utilisation d'une couverture recouvrant 75% de la surface du sol cultivé en plein champ pourrait réduire à minima de 22% les consommations en eau d'irrigation d'une ferme maraichère en 2060. Enfin, la variabilité d'une année sur l'autre des besoins en irrigation va également augmenter dans les décennies à venir, challengeant aussi le maraichage.

Ainsi, à l'échelle d'une vie, les maraichères du plateau de Saclay pourront observer l'impact non négligeable du changement climatique sur les besoins en irrigation de leurs cultures.

IV. Discussion

Le travail que j'ai produit n'est qu'un début de réponse à la problématique « Comment faire perdurer le maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau sous l'impact du changement climatique ? ». Pour les maraichères du plateau de Saclay et les actrices concernées, ce travail a pour mérite de tracer des tendances quant à l'impact du changement climatique sur les besoins en irrigation du maraichage. Dans n'importe quel contexte géographique, cette simulation peut être intéressante car elle permet de prévoir comment le changement climatique risque d'impacter les besoins en irrigation du maraichage et ainsi de s'adapter. Cependant, si l'on souhaite répondre à la problématique dans son intégralité, il nous faudrait embrasser un point de vue plus large, un point de vue qui soit systémique car le problème du changement climatique l'est. Il faut donc développer une pensée qui englobe toutes les actrices et qui inclut toutes les échelles. Dans cette dernière partie, je tente de développer cette pensée à travers des perspectives pour tenter de répondre de manière plus complète à la problématique que j'ai définie.

La « sine qua non » adaptation des fermes maraichères

Etant donné que la ressource en eau pour l'irrigation est limitée et que les perturbations liées au climat s'intensifient et continueront de s'intensifier, un enjeu essentiel afin que le maraichage puisse véritablement perdurer en France est la capacité d'adaptation de ces fermes maraichères et donc, la reconfiguration des agroécosystèmes pour que ceux-ci soient résilients. Cela passe par une transformation agroécologique des fermes maraichères. Les solutions d'amélioration de l'efficacité et celles de substitution, telles que le changement des dates de plantation, l'introduction de nouvelles variétés, l'expansion et l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation, permettront de modérer seulement temporairement les impacts négatifs du changement climatique (Altieri et al., 2015). L'adaptation du maraichage au changement climatique appelle à un véritable redesign de nos agroécosystèmes : ils doivent devenir plus complexes et héberger une plus grande biodiversité fonctionnelle. Sur l'échelle de Gliessman présentant les étapes de la transition vers un système alimentaire durable, au niveau de l'agroécosystème, cela signifie qu'il faut orienter la transition jusqu'au niveau 3 : « Reconcevoir l'ensemble de l'agro-écosystème » (Gliessman, 2015).

A travers une gestion agroécologique de la ressource en eau

La transformation agroécologique des fermes maraichères inclut aussi une gestion agroécologique de l'eau. Cette partie présente les pratiques ou les modifications de l'agroécosystème à entreprendre une gestion agroécologique de la ressource en eau. Elle se base sur les enseignements dispensés par Barbara Haurez dans le cours « Fondements d'agroécologie tropicale et tempérée » et son module « Gestion de la fertilité du sol » du master d'agroécologie. Lorsque d'autres sources sont utilisées, elles sont mentionnées.

L'idée principale de ce mode de gestion est la rétention de l'eau à travers la fermeture des cycles liés à l'eau (Haurez, 2022). Le premier levier à mobiliser alors est la réduction du ruissellement à l'aide de diverses approches. Une première approche est l'installation de barrières mécaniques, végétales ou mixtes, qui permet

de réduire les mouvements de l'eau et qui favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol. Nombreuses des barrières présentées ci-après sont représentatives d'installations mises en place dans des climats plus secs, il peut donc être intéressant de s'en inspirer. Une partie de ces barrières peuvent être mises en place à l'échelle du territoire et de la ferme comme les terrasses radicales, les terrasses progressives avec talus en amont ou en aval, les fossés isohypses, les cordons et diguettes, les clayons et fascines, les seuils de correction, les fossés d'infiltration mais également, les bandes enherbées et les haies vives. Une autre partie de ces barrières contre le ruissellement peuvent être mises en place à l'échelle de la parcelle de culture comme le billonnage, les buttes, les negarims, les demi-lunes et les zaïs. Pour n'en retenir qu'une, la technique des zaïs, issue d'Afrique du Sub-Sahara, est reprise par Miguel Altieri, figure proue de l'agroécologie. Il la présente comme une technique de culture permettant à la fois de réduire le ruissellement mais aussi l'évaporation et de faire face au problème des pluies concentrées sur quelques mois (Altieri et al., 2015). C'est donc une solution intéressante car le climat en France pourrait également tendre vers cette tendance dans certaines régions. Ensuite, la seconde approche qui permet de réduire le ruissellement se réfère à des pratiques culturales qui limitent ou éliminent le travail du sol car un sol déplacé est synonyme de risque d'érosion. Parmi ces pratiques culturales, nous pouvons citer le semis direct, le labour minimum ou localisé, les binages localisés... Le couvert du sol est aussi une pratique permettant de réduire significativement l'érosion et donc le ruissellement. Il est estimé qu'un sol couvert à 30% permet une réduction en moyenne de 70% de l'érosion, tandis qu'un sol couvert à 100% permet la suppression de toute érosion et ruissellement. Pour finir, la dernière approche permettant la réduction du ruissellement consiste à éviter la compaction du sol. Cela se traduit par la réduction du nombre de passages d'engins sur le sol ainsi que la réduction de la masse appliquée, la création de zones dédiées au passage des personnes ou bien, la mise en place d'un couvert végétal. Ce dernier permet une décompaction du sol par le travail de ses racines.

Un second levier clé à mobiliser pour fermer les cycles est l'amélioration de la capacité de rétention de l'eau du sol par l'amélioration de la qualité de la structure du sol. Le rôle prépondérant de la biodiversité du sol dans sa structuration est désormais connu. Il faut ainsi favoriser la vie dans le sol. Pour cela, il faut éviter l'utilisation d'engrais de synthèse ou de pesticides qui nuisent aux organismes du sol (Mader et al, 2002). Le travail du sol, en plus de détruire la structure du sol, peut aussi perturber et nuire aux organismes du sol. C'est une autre raison de le limiter. Ensuite, il est également nécessaire de nourrir les organismes du sol par l'amendement en matières organiques. La décomposition et l'intégration dans le sol de la matière organique par les organismes permet par ailleurs d'augmenter le taux de matière organique du sol, facteur clé dans la capacité de rétention de l'eau du sol et dans la tolérance des plantes face aux sécheresses (Altieri et al., 2015). L'importance de la vie du sol ayant été reconnue pour la fertilité du sol et la santé des plantes, certaines maraichères pratiquent « le maraichage sur sol vivant » en optant pour des pratiques perturbant au minimum les organismes du sol. La capacité de prélèvement de l'eau par les plantes peut aussi être améliorée grâce aux

possibles symbioses avec des mycorhizes, offrant à la plante une résistance augmentée aux stress hydriques liés aux sécheresses (Visser, 2022).

Enfin, un dernier levier qu'on peut mobiliser pour fermer les cycles liés à l'eau est la réduction de l'évapotranspiration. L'évaporation de l'eau du sol peut être réduite grâce à une couverture du sol la plus complète et permanente possible. Il existe différents types de couverts qui peuvent être mis en place : le couvert végétal vivant avec des plantes de couverture ou des cultures associées, le paillage à l'aide de matières organiques sèches, de roches, de films plastiques ou de géotextiles. Le modèle simplifié de prévisions des besoins en irrigation avec une modélisation de la couverture du sol présente des résultats concordants sur la réduction de la part d'évaporation de l'eau du sol. Les résultats pour la succession typique 2 sont présentés en annexe 6. Ainsi comme vu dans la partie précédente, le couvert du sol présente un grand impact sur les besoins d'apport d'eau supplémentaire. Outre la réduction de l'évaporation, le couvert végétal permet aussi de réduire drastiquement le ruissellement et l'érosion des sols mais également de réguler la température du sol, ce qui rend la vie dans le sol plus favorable. Ensuite, l'évapotranspiration peut aussi être réduite grâce à des pratiques comme l'agroforesterie qui permettent la création de microclimats favorables aux cultures. La création de barrières perméables permet de freiner la vitesse du vent et donc réduire la transpiration des plantes. La présence d'arbres dans l'agroécosystème permet aussi un grand apport de biomasse qui est intéressant pour l'amendement en matière organique du sol. Certains arbres peuvent également présenter une fonction d'ascenseurs hydrauliques permettant une redistribution de l'eau issue des profondeurs dans les profils de sol accessibles aux cultures et la mise à disposition des nutriments anciennement lixiviés. L'arbre permet donc la création de microclimat, réduisant l'évapotranspiration, et peut grandement participer à la fertilité des sols. C'est un élément clé qui doit revenir dans nos agroécosystèmes pour leur apporter résilience.

Qui doit aller de pair avec un partage des risques liés au climat

Les solutions présentées ci-dessus pour une gestion agroécologique de l'eau offrent une résilience des fermes maraichères aux perturbations telles que les sécheresses édaphiques. Ce sont aussi des solutions soutenables dans le futur car elles sont sobres énergétiquement. Cependant, mettre en place de telles pratiques n'est pas forcément aisé. Pour les maraichères, cela demande de l'énergie, du temps, de l'argent et des connaissances. La transition vers une gestion agroécologique de l'eau doit donc être accompagnée par différentes actrices afin que ce ne soit pas aux maraichères, ou aux agriculteur·trices d'une manière générale, de supporter tout le poids du changement climatique. Ici, le partage des risques liés au climat est essentiel car il permet une justice sociale et environnementale. Chacun·e doit assumer ses responsabilités vis-à-vis des dégâts du changement climatique.

Tout d'abord, pour que le maraichage de proximité puisse faire face au changement climatique, notre pouvoir d'action, en tant que mangeur·euse, se trouve dans un échange commercial qui permet la rémunération du travail et non pas la production. La production étant soumise aux risques liés au climat, il est injuste d'imaginer

faire perdurer ce système où les agriculteur·trices ne sont pas rémunéré·es pour leur travail si leur production subit les dégâts du climat. En considérant que nous sommes tous et toutes plus au moins responsables du changement climatique, il faut en assumer les conséquences dans notre manière de nous approvisionner en aliments. Le système des AMAP, en expansion depuis les années 2000 en France, est l'exemple le plus répandu qui permette une rémunération garantie à l'agriculteur (Vereecken, 2022). Il existe cependant plusieurs manières de partager les risques liés au climat entre les mangeur·euses et producteur·trices et encore sûrement de nombreuses manières à inventer. Pour que le maraichage puisse perdurer dans un contexte de changement climatique, il faut donc « Ré-établir une connexion entre les producteurs et les consommateurs, développer des réseaux alimentaires alternatifs » (Gliessman, 2015). Cela correspond au niveau 4 sur l'échelle de Gliessman.

Ensuite, le monde de la recherche devrait être financé pour soutenir la transition agroécologique et permettre de développer des savoirs ancrés pour chaque territoire en participation avec les agriculteur·trices. Concernant le maintien et le développement du maraichage en France les prochaines décennies dans un contexte de raréfaction de l'eau, il y a une urgence à développer des savoirs avec les maraicher·ères qui soient véritablement à leur service. Un des gros enjeux est l'étude des différents couverts du sol pour que ceux-ci, selon le contexte, soient un juste compromis entre réduction de l'évaporation de l'eau du sol, gestion des ravageurs, gestion des adventices, gestion de la fertilité du sol, pollution des sols, sobriété énergétique, facilité de mise en place... L'agroforesterie doit aussi être soutenue par le monde scientifique. La recherche doit donc pouvoir s'engager activement dans la création de connaissances in situ avec les maraicher·ères. Concernant la transmission de ces connaissances, elle doit pouvoir être soutenue par une horde de facilitateur·trices dans le milieu agricole permettant la mise en place de réseaux d'apprentissages collectifs. En effet, la transmission des pratiques par des dynamiques collectives est une des conditions pour une écologisation robuste de notre agriculture (Lamine, 2011).

Pour finir, l'essor de ces pratiques permettant l'adaptation du maraichage aux sécheresses doit également être soutenu par les politiques comme la politique agricole commune. Les initiatives de PAT, comme dans le cas du plateau de Saclay, peuvent être également être à l'origine de ce soutien apporté aux maraicher·ères pour faire face au changement climatique. Comme nous l'a appris le cours « Théories et Gestions des Transitions Ecologiques » de Pierre Stassart, « les transitions sont des mouvements circulaires de brassage » ainsi la transition agroécologique doit pouvoir conjointement venir d'initiatives top-down que bottom-up (Stassart, 2021).

Si l'on se réfère à l'échelle de la transition agroécologique de Gliessman, le maraichage pourra donc perdurer dans un contexte de raréfaction de l'eau lié au changement climatique si une reconception transformatrice de l'agroécosystème est faite mais également une transformation du système alimentaire (Gliessman, 2015). En quelques mots, des efforts d'adaptation doivent donc être fournis par les maraicher·ères mais que ceux-ci doivent être soutenus par les mangeur·euses, chercheur·euses, et politiques. Ensuite, le maraichage ne pourra

perdurer et se développer que si un accès sécurisé à l'eau pour irriguer est garanti. C'est ce qui est développé dans la partie suivante.

Mais aussi un accès sécurisé à l'eau d'irrigation

Le maraichage pour pouvoir perdurer doit pouvoir avoir un accès sécurisé à l'eau d'irrigation. Du travail réalisé pour ce mémoire, on peut conclure que les besoins en irrigation vont conséquemment augmenter à l'horizon 2060 sous l'effet du changement climatique sur le plateau de Saclay. Cette tendance pourrait se généraliser dans de nombreuses régions en France. De plus, dans une perspective de résilience alimentaire, la multiplication nécessaire des fermes maraichères de proximité va accroître d'autant plus la part des besoins en eau d'irrigation pour le maraichage. Ce constat exige donc que le maraichage ait accès à la ressource en eau pour pouvoir irriguer ses cultures et cela appelle à des prises de décisions sur la gestion de l'eau si nous souhaitons que le maraichage puisse se maintenir et se développer dans ce contexte.

L'article « Transitioning out of Open Access : A Closer Look at Institutions for Management of Groundwater Rights in France, California, and Spain » de Rouillard et les autres, propose une analyse intéressante de la réglementation française autour de l'eau à travers un cadre conceptuel développé par Schlager et Ostrom, « the Bundle of Rights », que l'on peut traduire par « Faisceau de droits ». Ce cadre permet de distinguer les droits d'accès, les droits de prélèvement, les droits de choix collectifs, les droits d'exclusion et les droits d'aliénation.

D'une manière générale, ces droits diffèrent selon s'ils concernent une zone de répartition des eaux (ZRE) ou non. Une ZRE est définie quand les aquifères présentent « une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins » (Préfet de la Charente-Maritime, 2018). Pour partager l'eau entre les différents agriculteur·trices, des instances appelées Organismes Uniques de Gestion Collective (OUGC) sont mises en place au sein des ZRE.

Le droit d'accès est géré par des permis de forage et d'installation d'une pompe. En temps normal, ces permis sont garantis sauf si le forage concerne une ZRE (Rouillard et al., 2021). Pourtant, d'après l'expérience de mon stage, j'ai pu remarquer que récemment les autorisations de forages sont difficiles à obtenir pour les nouvelle·aux irrigant·es que ce soit en ZRE ou non. Un membre d'un OUGC m'a partagé que d'après lui, depuis plusieurs années, la tendance implicite qui régit le droit d'accès à l'eau d'irrigation est « premier arrivé, premier servi ». Une autre discussion m'a appris que les démarches pour obtenir ces autorisations sont très lourdes pour les maraicher·ères et que l'obtention de l'autorisation de forage peut même prendre jusqu'à 2 ans, si elle n'est pas refusée. Cela pose des questions d'équité et cette situation doit être corrigée afin que le maraichage de proximité puisse véritablement perdurer.

Le droit de prélèvement est géré par des permis de prélèvement accordés par l'état ou les OUGC en ZRE. D'une manière générale, un permis de prélèvement est nécessaire si l'extraction annuelle excède 10000 m³. La particularité des ZRE réside dans la mise en place de limites d'extraction durables comme une enveloppe globale dont les extractions totales ne peuvent dépasser ce seuil (Rouillard et al., 2021).

Le droit de choix collectif et le droit d'exclusion sont détenus par deux instances. Les Commissions locales de l'eau définissent les limites d'extraction durable et la répartition de l'eau entre les secteurs de l'agriculture, l'industrie et l'approvisionnement urbain. Ensuite, les OUGC possèdent le droit de répartition de l'eau dans la limite d'extraction durable entre les agriculteur·trices irrigant·es au sein des ZRE (Rouillard et al., 2021).

Que ce soit la répartition de l'eau entre les secteurs ou bien entre les agriculteur·trices, il me semble urgent de favoriser l'accès à la ressource en eau pour les activités et secteurs qui participent à l'habitabilité de la terre. Cela signifie que, dans un contexte de raréfaction de l'eau où les sécheresses vont devenir de plus en plus fréquentes sous l'effet du changement climatique, l'eau disponible sur terre doit permettre aux activités essentielles à la vie, humaine et non-humaine, sur terre de perdurer. Dans une limite d'extraction durable, l'accès à l'eau devrait donc être favorisé pour les activités essentielles au maintien des sociétés humaines (boire de l'eau, la santé et le soin, l'éducation et la culture, la production alimentaire nourricière...) participant au bien commun humain et non-humain, permettant l'habitabilité de la terre par les humain·es, sans détériorer celle des autres êtres vivants et donc, sans détériorer le climat ou l'environnement. D'une manière assez simplifiée, si un effort est produit pour que l'activité en question ne détériore pas l'habitabilité de la terre alors il paraît juste que cette activité ait accès aux « fruits de la terre » soit à la ressource en eau de la terre... comme une réprocité à l'échelle de la planète.

Ici, l'enjeu est de taille car il s'agit de changer notre manière d'habiter la terre. Comme l'expriment Pablo Servigne et Gauthier Chapelle dans leur ouvrage « L'entraide, l'autre loi de la jungle » : aujourd'hui, nos sociétés fonctionnent sur une logique de coûts collectifs et bénéfices individuels or pour lutter contre le changement climatique, la logique devrait être inversée avec des coûts individuels de la part des individus et des états pour des bénéfices collectifs permettant mieux-être global (Servigne & Chapelle, 2017). Dans ce contexte, infléchir un accès favorisé à la ressource en eau pour les activités qui participent à l'habitabilité de la terre présente comme prérequis l'existence d'un récit commun, « moteur essentiel dans l'évolution des sociétés » (Dion, 2018). Politiquement, en s'appuyant sur le cours « Politiques et actions publiques » de Sébastien Brunet, intervenu lors du premier quadrimestre dans le cadre du master d'Agroécologie, cela se traduit par le besoin de construire un intérêt général inclusif de tout·es humain·es et toute forme de vie et non pas seulement, d'une seule tranche de la population humaine, pour une entraide généralisée à l'échelle de la planète. La construction de cet intérêt général est une condition essentielle pour que les décideur·euses, notamment l'état qui accorde ou non les permis de forages, les commissions locales de l'eau et les OUGC, puissent ensuite faire en sorte que la réglementation régissant la gestion de l'eau implémente une répartition qui favorise un accès aux activités qui participent l'habitabilité de la terre et non plus, un accès qui soit régi par la loi du « premier arrivé, premier servi ».

D'une manière générale, je pense qu'une gestion collective et territorialisée de l'eau doit être mise en place à l'échelle de toute la France sur le modèle des Zones de Répartition de l'Eau et de la gestion collective des OUGC. Afin que la gestion des aquifères soit équitable et durable, il serait intéressant de s'intéresser à la

représentativité des agriculteur·trices au sein de ces groupes mais aussi de s'intéresser aux modes de gouvernance et de vérifier s'ils remplissent les 8 critères d'Elinor Ostrom qui permettent une gestion collective et durable des biens communs (Ostrom, 2010).

Ensuite, dans leur ouvrage « L'entraide : l'autre loi de la jungle », Pablo Servigne et Gauthier Chapelle expriment les humains ont toujours su faire face au manque de ressources en se reconstruisant grâce à l'entraide. Ces deux auteurs nous mettent cependant en garde dans leur ouvrage : le plus dangereux, face à un manque de ressources, c'est de devoir le gérer avec une culture individualiste. Dans nos sociétés occidentales, cette culture s'est répandue. La création d'un confort de vie extrême nous a fait croire que l'on peut vivre en se passant des autres et de notre environnement. Les deux auteurs insistent sur l'importance de recréer une culture de l'entraide pour faire face aux enjeux liés au climat (Servigne & Chapelle, 2017). Ainsi, les OUGC, ou futurs groupes collectifs de gestion de l'eau, pourraient mettre en place des mécanismes qui permettent l'émergence de l'entraide au sein de ces mêmes groupes. Pour cela, il faut se saisir des mécanismes de réciprocité indirecte et renforcée (Servigne & Chapelle, 2017). Le mécanisme de réciprocité indirecte repose sur la réputation et permet d'étendre notre confiance à des personnes que nous ne connaissons pas. Il favorise des comportements vertueux (Servigne & Chapelle, 2017). Dans le cas d'une gestion collective de l'eau, cela pourrait se traduire par une transparence des agriculteur·trices à propos de leurs consommations en eau et un partage de cette information aux autres membres du groupe. Cela pourrait inciter les agriculteur·trices à réduire autant que possible leurs consommations en eau pour partager cette ressource avec les autres et donc les inciter à adopter des pratiques économes en eau, basées sur la fermeture des cycles comme présenté plus tôt dans ce rapport. Ensuite, pour favoriser l'entraide au sein de ces groupes de gestion collective de l'eau, les mécanismes de réciprocité renforcée peuvent être mis en place. Ils consistent à récompenser les comportements pro-sociaux et à punir les comportements anti-sociaux sur le schéma de la carotte et du bâton (Servigne & Chapelle, 2017). Dans le cas de la gestion de l'eau, les comportements pro-sociaux sont les pratiques agricoles économes en eau qui permettent de laisser une part du gâteau aux autres, une part d'eau pour l'irrigation dans la limite d'extraction durable. Dans notre cas, la carotte pourrait être un accès favorisé en temps de pression forte sur l'eau. La punition doit être choisie collectivement et pour être efficace, elle doit être juste, bien proportionnée et discrète (Servigne & Chapelle, 2017). Dans le cas de la gestion de l'eau, cela pourrait être un accès en cas de fortes pressions sur la ressource, qui passe après les agriculteur·trices qui ont montré des comportements pro-sociaux. Ici, le groupe de gestion collective de l'eau, posséderait donc le droit d'exclusion et de punition. La punition n'est actuellement pas un droit des OUGCs car les dépassements sur les prélèvements sont gérés par la police de l'eau. La punition est d'ailleurs préconisée par Elinor Ostrom dans les principes fondamentaux de la bonne gouvernance d'un bien commun (Ostrom, 2010). Des sanctions graduelles et proportionnelles à la gravité des actes permettent de répondre au besoin de sentiment de justice au sein des groupes (Servigne & Chapelle, 2017).

Cette gestion collective de l'eau à l'échelle territoriale devrait donc être mise en place pour une gestion durable et équitable. De surcroît, en abordant la transition agroécologique des systèmes alimentaires à travers la théorie économique du push/pull, la gestion territoriale de l'eau selon les principes d'Ostrom et en mobilisant les mécanismes de l'entraide, peut être considérée comme une opportunité pour tirer vers une transition agroécologique des agroécosystèmes tandis que le soutien déployé par les mangeur·euses, chercheur·euses et politiques pour l'adaptation du maraichage au changement climatique peut être perçue comme une opportunité pour pousser vers la transition agroécologique.

Outre la gestion du prélèvement dans les aquifères, la gestion de l'eau à l'échelle du territoire exige aussi une gestion équitable et durable des reports d'eau. En effet, l'augmentation de l'intensité des pluies extrêmes et de la durée des épisodes de sécheresse météorologique vont demander que l'on développe des stratégies de reports de l'eau des précipitations. Tout d'abord, il semble important de réaliser des études d'incidences sur la mise en place de retenues des précipitations sur l'état des aquifères. La mise en place de mares ou bassins de rétentions de l'eau de pluie doit satisfaire à une gestion durable de la ressource en eau. Puis, l'eau des retenues doit être partagée. Encore une fois, je pense qu'une gestion collective doit être mise en place et que la priorité de prélèvement doit être donnée aux secteurs ou activités participant à l'habitabilité de la terre.

Dans ces perspectives, je pense que le maraichage pourra perdurer et se développer seulement si une gestion collective, éthique et durable de l'eau à l'échelle des différents territoires est mise en place. Cela rejoint le niveau 5 de Gliessman : « Reconstruire un système alimentaire mondial durable et équitable pour tous » (Gliessman, 2015).

Actuellement, la réglementation ne permet pas de satisfaire ces conditions. Des décisions politiques doivent être prises pour savoir dans quel monde nous souhaitons vivre... Vers une privatisation de l'eau par les secteurs les plus influents et polluants ou une gestion de la ressource en eau permettant justice sociale et environnementale ?

V. Conclusion

Ce travail a pour objectif de répondre à la problématique : « Comment faire perdurer le maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau sous l'impact du changement climatique ? ». Pour ce faire, tout d'abord, il a été présenté dans la partie « Problématisation », pourquoi le maraichage est une agriculture qui présente de bonnes raisons d'être maintenue et développée dans un contexte de changement climatique. Sous certaines formes_ échelles réduites, biologiques, peu motorisées et avec une commercialisation en circuits courts_, c'est une agriculture qui répond au critère double de santé humaine et environnementale.

Puis, j'ai eu l'occasion de répondre en partie à cette question grâce au travail que j'ai produit dans le cadre d'un stage au sein de l'INRAE et à la participation au projet ClimaLeg-Eau. Le travail réalisé a permis d'estimer l'évolution des besoins en irrigation pour le maraichage en plein champ sur le plateau de Saclay à l'horizon 2060. Le modèle développé dans ce but est présenté dans la partie « Matériel et Méthodes », tandis que les résultats des simulations de ce modèle sont présentés dans la partie « Résultats et analyse ». Le principal résultat permet d'établir que **les besoins en irrigation pour les cultures en plein champ d'une ferme maraichère sur le plateau de Saclay pourraient augmenter à minima d'environ 17% d'ici 2060.** C'est une information qui permet de répondre en partie à ma problématique car dans le contexte du projet ClimaLeg-eau et du plateau de Saclay, elle permet de prévoir comment le changement climatique risque d'impacter les besoins en irrigation du maraichage et ouvre le champ des possibles à l'adaptation. Dans la suite du projet, ces données vont être présentées lors d'une réunion avec les maraichères et les acteurs territoriaux. Il s'agira alors pour elleux de choisir ce qu'elles et ils en font.

Enfin, dans la partie « Discussion », j'ai dressé un certain nombre de conditions qui me semblent essentielles afin que le maraichage puisse véritablement perdurer dans un contexte de raréfaction de la ressource en eau lié au changement climatique. Tout d'abord, je pense que les fermes maraichères n'auront d'autres choix que d'apprendre à s'adapter. Cette adaptation requiert une réelle reconception des agroécosystèmes et une gestion agroécologique de la ressource en eau cependant, elle doit être soutenue et accompagnée par toutes les actrices concernées afin que les risques liés au climat qui pèsent sur le maraichage soient partagés. Enfin, le maraichage doit pouvoir avoir un accès sécurisé à l'eau d'irrigation. Cela nécessite de revoir la gestion réglementaire de l'eau afin cette gestion soit équitable et durable.

VI. Bibliographie

Allen, R., G., Pereira, L., S., Raes, D., Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).

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. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>

Argouarc'h, J. (2005). Les cultures légumières en agriculture biologique, Fiches technico-économiques des principaux légumes, culture de plein champ et sous abri. CFPPA Rennes-Le Rheu.

Avec le programme LEADER / Terre & Cité. (s. d.). Consulté 9 juin 2023, à l'adresse <https://terreetcite.org/avec-le-programme-leader/>

Bisbis, M. B., Gruda, N., & Blanke, M. (2017). Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality – A review. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1602-1620. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224>

BRL (s. d.). Culture légumière, partie 5 irrigation fiches cultures légumières.

Chambre d'agriculture de Région Ile-de-France (2019). Fiches de références techniques des exploitations agricoles légumières d'Ile-de-France.

Delaunoy, A., Boucher, G., Plence, A. (2014). Caractérisation de la réserve en eau des sols à partir des sondages pédologiques à la tarière, *Agricultures et territoire*, Chambre d'agriculture du Tarn. Dion, C. (2018). *Petit manuel de résistance contemporaine*. Ed. Actes Sud, 160p. ISBN : 978-2-330-10144-2

Dion C. (2018). *Petit manuel de résistance contemporaine*. Ed. Actes Sud, 160 p. ISBN : 978-2-330-10144-2

Doussan, C., Ruedessols, C., & Cousin, I. (2017.). *La Réserve Utile : Concepts, outils, controverses. Impacts du changement climatique : Atmosphère, Températures et Précipitations*. Atelier du RMT Sols et Territoires, Orléans, France. 40 p. hal-01595478

Escaffre, R. (2023). *L'infographie annuelle de la NBPE 2019, Etat des lieux et chiffres clés*. Ed. Office français de la biodiversité, 5 p.

Fozouzani, M., Karami, E., Zamani, Gh., H., Moghaddam, K., R. (2013). *Agricultural water poverty: Using Q-methodology to understand stakeholders' perceptions*. Ed. Elsevier.

Gliessman, S., R. (2015). *Agroecology, The Ecology of Sustainable Food Systems*. 3rd Ed. CRC Press, 371 p. ISBN : 978-1439895610

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, (2019). *Climate Change and Land : IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems (1re éd.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, (2023). *SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)*, Summary for Policymakers.

- Haurez, B. (2022). Cours « Fondements d'agroécologie tropicale et tempérée », partie « Gestion de la fertilité du sol », d'après le cours de Michel Sonet. Dispensé à Gembloux AgroBio Tech, suivi dans le cadre du master Agroécologie de l'ULiège et l'ULB
- Lamine, C. (2011). Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. In *Journal of Rural Studies* (pp.1-11). Ed. Elsevier.
- Les microfermes, un projet de vie au cœur d'un territoire.* (2017). INRAE Institutionnel. Consulté 9 juin 2023, à l'adresse <https://www.inrae.fr/actualites/microfermes-projet-vie-au-coeur-dun-territoire>
- Les zones de répartition des eaux (ZRE)—Cadre général—Gestion quantitative de la ressource—Eau et milieux aquatiques—Environnement, risques naturels et technologiques—Actions de l'État—Les services de l'État en Charente-Maritime.* (2018). Consulté 10 juin 2023, à l'adresse <https://www.charente-maritime.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Eau-et-milieux-aquatiques/Gestion-quantitative-de-la-ressource/Cadre-general/Les-zones-de-repartition-des-eaux-ZRE>
- Mader, P., Fliebbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* vol. 296, 1694- 1697. DOI: [10.1126/science.1071148](https://doi.org/10.1126/science.1071148)
- Maraîchage. (2023). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mara%C3%AEchage&oldid=203085903>
- Marshall, L. (2022). Intervention « Global Change and Agriculture » dans le cours « Recherche et Développement en Agroécologie » de Nicolas Vereecken. Dispensé à l'ULB, suivi dans le cadre du master Agroécologie de l'ULiège et l'ULB
- Ministères Écologie Énergie Territoires (2022). Consulté 9 juin 2023, à l'adresse <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>
- Morel, K. (2016). Viabilité des microfermes maraîchères biologiques. Une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation. Sciences agricoles. Université Paris Saclay (COMUE), 2016. Français. (NNT : 2016SACLA023). (tel-02801554v3)
- Oppenheimer, M. (2022). Comment fonctionne le climat, La découverte du changement climatique (pp.23-28). Le grand livre du climat, sous la direction de Greta Thunberg. Ed. Kero, 464 p. ISBN : 2702168523
- Ostrom, E. (2010). Gouvernance des biens communs : pour une nouvelle approche des ressources naturelles. Révision scientifique de Laurent Baechler, Ed. de Boeck, Planète en JEU, traduction française, 301 p.
- Projet Alimentaire Territorial (PAT) de la Plaine aux Plateaux / Terre & Cité.* (s. d.). Consulté 9 juin 2023, à l'adresse <https://terreetcite.org/patdelaplaineauxplateaux/>
- Qu'est-ce que la sécheresse?* (2020). INRAE Institutionnel. Consulté 9 juin 2023, à l'adresse <https://www.inrae.fr/actualites/quest-ce-que-secheresse>
- Rouillard, J., Babbitt, C., Pulido-Velazquez, M., & Rinaudo, J. -D. (2021). Transitioning out of Open Access : A Closer Look at Institutions for Management of Groundwater Rights in France, California, and Spain. *Water Resources Research*, 57(4). <https://doi.org/10.1029/2020WR028951>
- Servigne, P. & Chapelle, G. (2017). L'entraide, l'autre loi de la jungle. Ed. Les liens qui libèrent, 384 p. ISBN : 979-10-209-0700-4

Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R., Tocquer, F., (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole.

Stassart, P. (2021). Cours « Théories et gestions des transitions écologiques ». Dispensé à Arlon Campus Environnement, suivi dans le cadre du master Agroécologie de l'ULiège et l'ULB

Touili, N. (2022). Projet CLIMALEG-Eau 2022-2023. Consulté 21 octobre 2022, à l'adresse <https://www6.versailles-grignon.inrae.fr/sadapt/Focus/CLIMALEG-Eau>

Touili, N. (2023). Projet CLIMALEG. Consulté 21 octobre 2022, à l'adresse [SADAPT UMR INRAE Agroparistech - CLIMALEG](#)

Vereecken, N., J. (2022). Cours « Innovations agroécologiques et production alimentaire », partie « Innovations sociales ». Dispensé à l'ULB, suivi dans le cadre du master Agroécologie de l'ULiège et l'ULB

Visser, M. (2022). Cours « Agroécologie », partie « Ecologie du sol ». Dispensé à l'ULB, suivi dans le cadre du master Agroécologie de l'ULiège et l'ULB

Visser, M. (2022). Cours « Agroécosystèmes et systèmes agraires », partie « De l'écosystème à l'agroécosystème : énergie ». Dispensé à l'ULB, suivi dans le cadre du master Agroécologie de l'ULiège et l'ULB

What is the difference between adaptation and mitigation? — *European Environment Agency*. (s. d.). [HelpCenter FAQ]. Consulté 9 juin 2023, à l'adresse <https://www.eea.europa.eu/help/faq/what-is-the-difference-between>

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

VII. Annexes

Annexe 1 : tutoriel d'utilisation du modèle

Le modèle sous la forme d'un fichier Excel comporte différentes feuilles dont :

- « Notice » : une feuille explicative du modèle ;
- « Données_Siclimate_Passé » : une feuille regroupant les données climatiques du passé fournies par Siclima ;
- « Données_Siclimate_Futur » : une feuille regroupant les données climatiques du futur fournies par Siclima ;
- « Données_Simulation » : une feuille regroupant les données Siclima sélectionnées qui sont simulées ;
- « Kcb_Calcul_Succession_1 » : une feuille de calcul du coefficient de transpiration pour les cultures de l'année 1 de la rotation ;
- « Kcb_Calcul_Succession_2 » : une feuille de calcul du coefficient de transpiration pour les cultures de l'année 2 de la rotation ;
- « Kcb_Total » : une feuille qui joint les courbes des Kcb pour les années 1 et les années 2 des rotations sur la période totale des données de la simulation ;
- « Ke_Calcul » : une feuille de calcul du coefficient d'évaporation du sol ;
- « Bilan_Hydrique » : une feuille de calcul du bilan hydrique et donc du calcul des besoins optimaux en irrigation selon l'évolution de la réserve utile ;
- « Graphes » : une feuille qui réunit les données les plus importantes et présente des graphes de résultats.

Réaliser une nouvelle simulation avec le modèle consiste en 4 étapes principales :

- ouvrir le modèle Excel ;
- modifier les paramètres d'entrée ;
- mettre à jour les tableaux croisés dynamique ;
- observer/ Afficher.

La première étape nécessite simplement d'avoir accès à Excel. Le chargement de toutes les données climatiques à l'ouverture du fichier peut être longue.

Comme dit précédemment, la seconde étape consistant à modifier les paramètres d'entrée concerne, les données Siclima, les données liées aux cultures et les données liées au sol.

A propos des données Siclima, pour simuler une autre maille, il faut :

- prélever les données qui vous intéressent dans les feuilles « Données_Siclimate_Futur » et « Données_Siclimate_Passé » ;

- puis remplacer les données dans la feuille « Données_Simulation » dans les cases bleues ;
- en sachant que :
 - l'ETP considérée est etppm et non etp_q ;
 - les précipitations à considérer sont totales : liquides et solides
 - pour les données passées : il faut sommer preliq_q et prenei_q puis rentrer la somme dans la colonne Precip_tot ;
 - pour les données futures : il faut utiliser prtot ;
 - La vitesse du vent est qualifiée sous les termes de ff_q et sfcwind ;
 - L'humidité relative est qualifiée sous les termes hu_q et hr.

Concernant les données liées aux cultures, pour simuler une autre succession, il faut :

- Successivement, modifier tout un set de paramètres associés à chaque culture dans les feuilles « Kcb_Calcul_Succession_1 » et « Kcb_Calcul_Succession_2 » ;
- Les deux feuilles correspondent respectivement à l'année 1 de la succession et l'année 2 de la succession, chacune de ces feuilles permet de simuler un maximum de 5 cultures ;
- Le schéma succession 1/succession 2 s'enchaîne dans le temps pour toutes les années simulées.

Voici ci-dessous le set de paramètres à modifier pour chaque culture :

- Cult_ : paramètre d'activation, 0 pour non-utilisé, 1 pour activée ;
- S_day : jour de la plantation/ semis ;
- S_month : mois de la plantation/ semis ;
- H_mid : hauteur de la plante après développement en mètres ;
- H_end : hauteur de la plante pendant flétrissement en mètres ;
- Zrac : profondeur d'enracinement en mètres ;
- Lini : nombre de jour pour le stade initial de développement de la plante ;
- Ldev : nombre de jour pour le stade de croissance de développement de la plante ;
- Lmid : nombre de jour pour le stade intermédiaire de développement de la plante ;
- Llate : nombre de jour pour le stade final de développement de la plante ;
- Kcbini : valeur du Kcb pour le stade initial de développement de la plante ;
- Kcbmid : valeur du Kcb pour le stade intermédiaire de développement de la plante ;
- Kcbend : valeur du Kcb pour le stade final de développement de la plante.

Concernant les données liées au sol, pour modifier le type de sol simulé, il faut modifier dans la feuille « Ke_Calcul » :

- HFC : l'humidité à la capacité au champ en pourcentage ;
- HWP : l'humidité au point de flétrissement en pourcentage ;

- Ze : la profondeur de sol soumis à l'évaporation en mètres ;
- REW : l'eau facilement évaporable en millimètres.

Certaines de ces données sont disponibles dans la table 19 (page 144) du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 ».

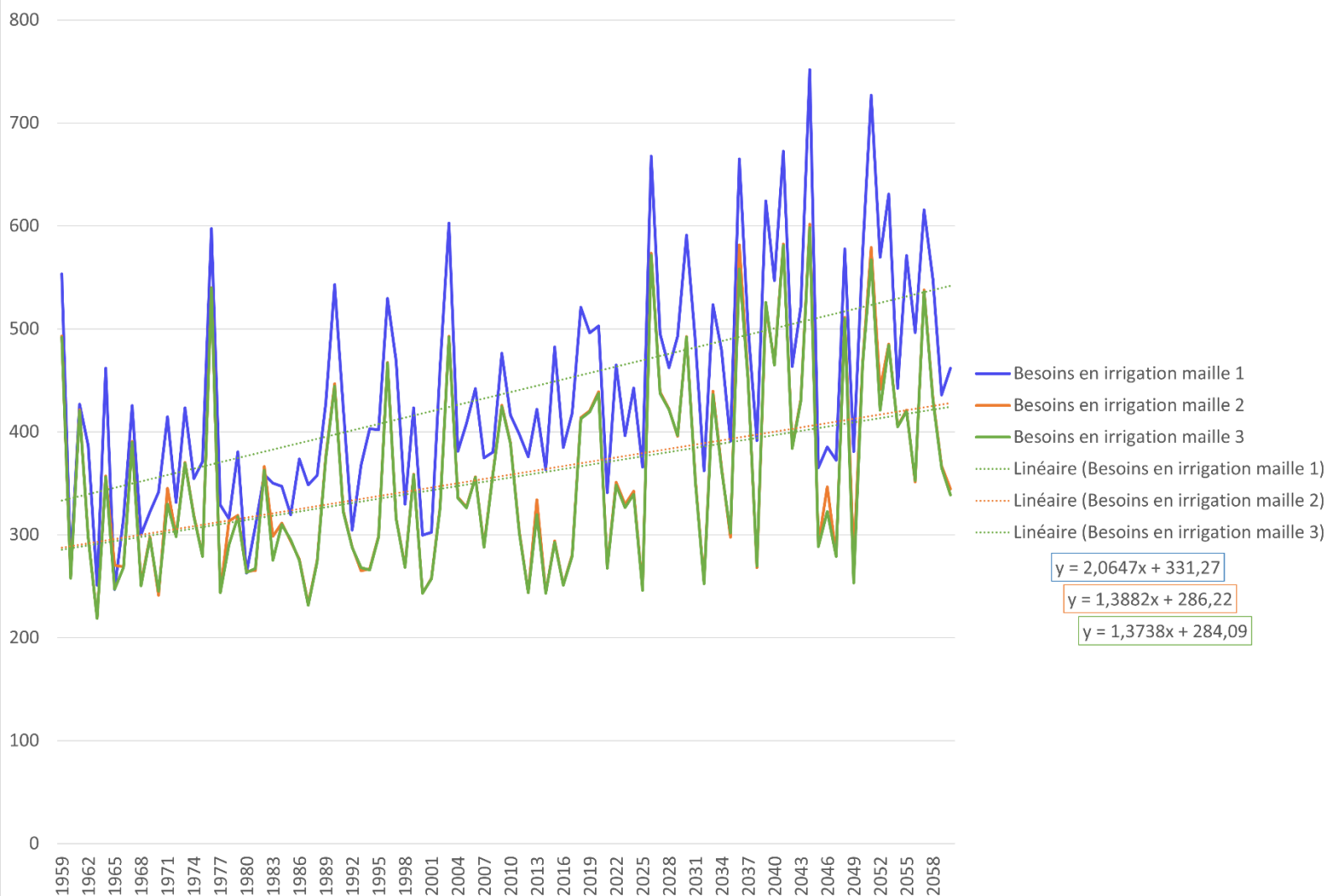
La troisième étape dans la création d'une nouvelle simulation consiste en la mise à jour des tableaux croisés dynamiques. D'une manière générale, si modification d'un paramètre ou données d'entrée il y a, il faut actualiser les TCD qui suivent. Pour ce faire, il faut faire « Clique droit/ Actualiser » sur le TCD. Voici les 4 tableaux croisés dynamiques à mettre à jour :

- TCD « Kcb_Calcul_Succession_1 » des colonnes AN à CN ;
- TCD « Kcb_Calcul_Succession_2 » des colonnes AN à CN ;
- TCD « Graphes » des colonnes O à U ;
- TCD « Graphes » des colonnes AR à AT.

Enfin, la dernière étape consiste à observer et afficher les résultats. Différents graphes importants sont générés automatiquement dans la feuille « Graphes » mais d'une manière générale, toutes les données intéressantes sont recensées dans cette feuille, il s'agit ensuite de les manipuler et de tracer les graphes désirés.

Annexe 2 : test de sensibilité maille géographique

Besoins en irrigation : test de sensibilité mailles pour la succession 1, sol nu



Maille 1 : 1679 (passé)- 14367 (futur), correspondant au plateau de Saclay.

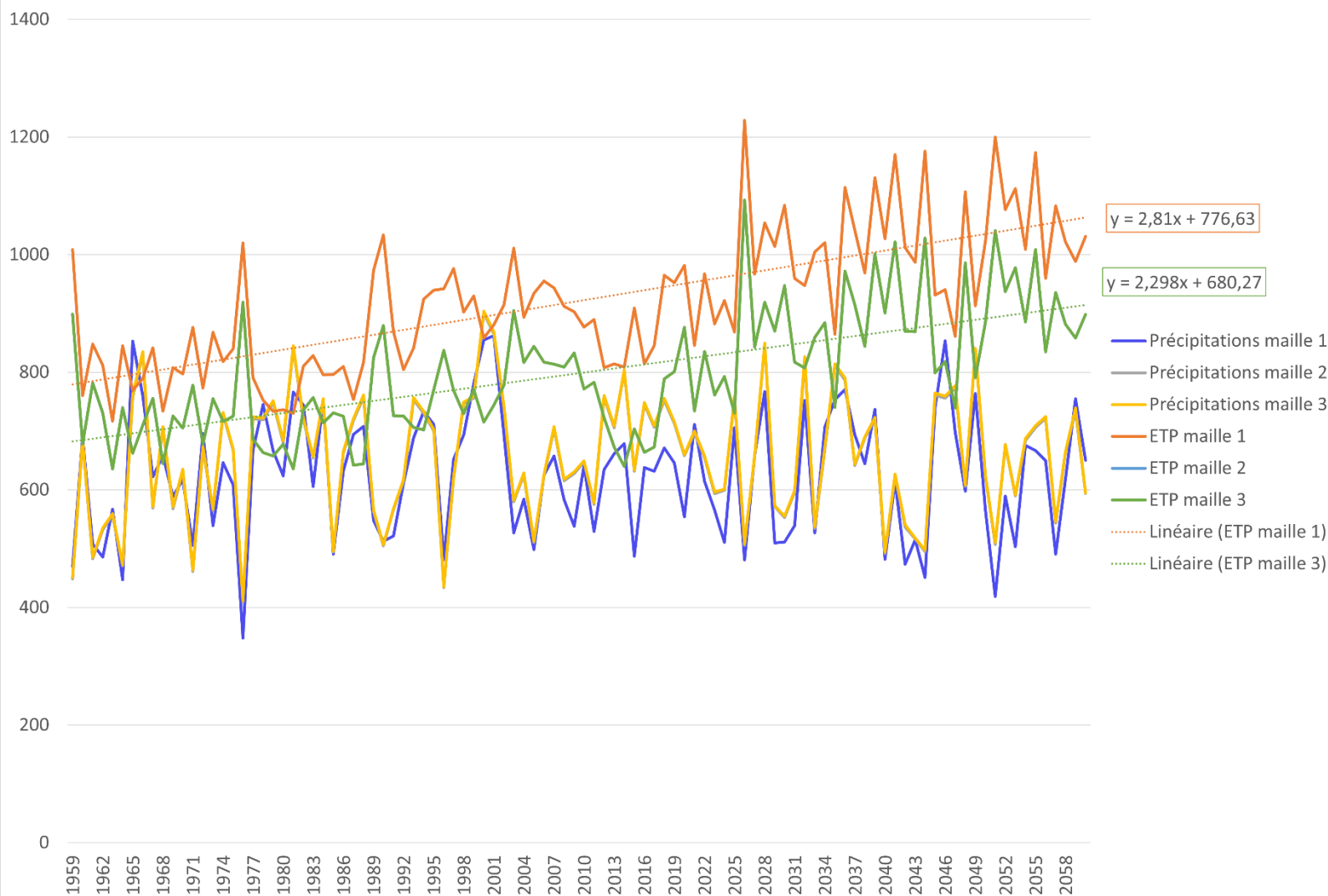
Maille 2 : 1674 (passé)- 14362 (futur).

Maille 3 : 1797 (passé)- 1421 (futur).

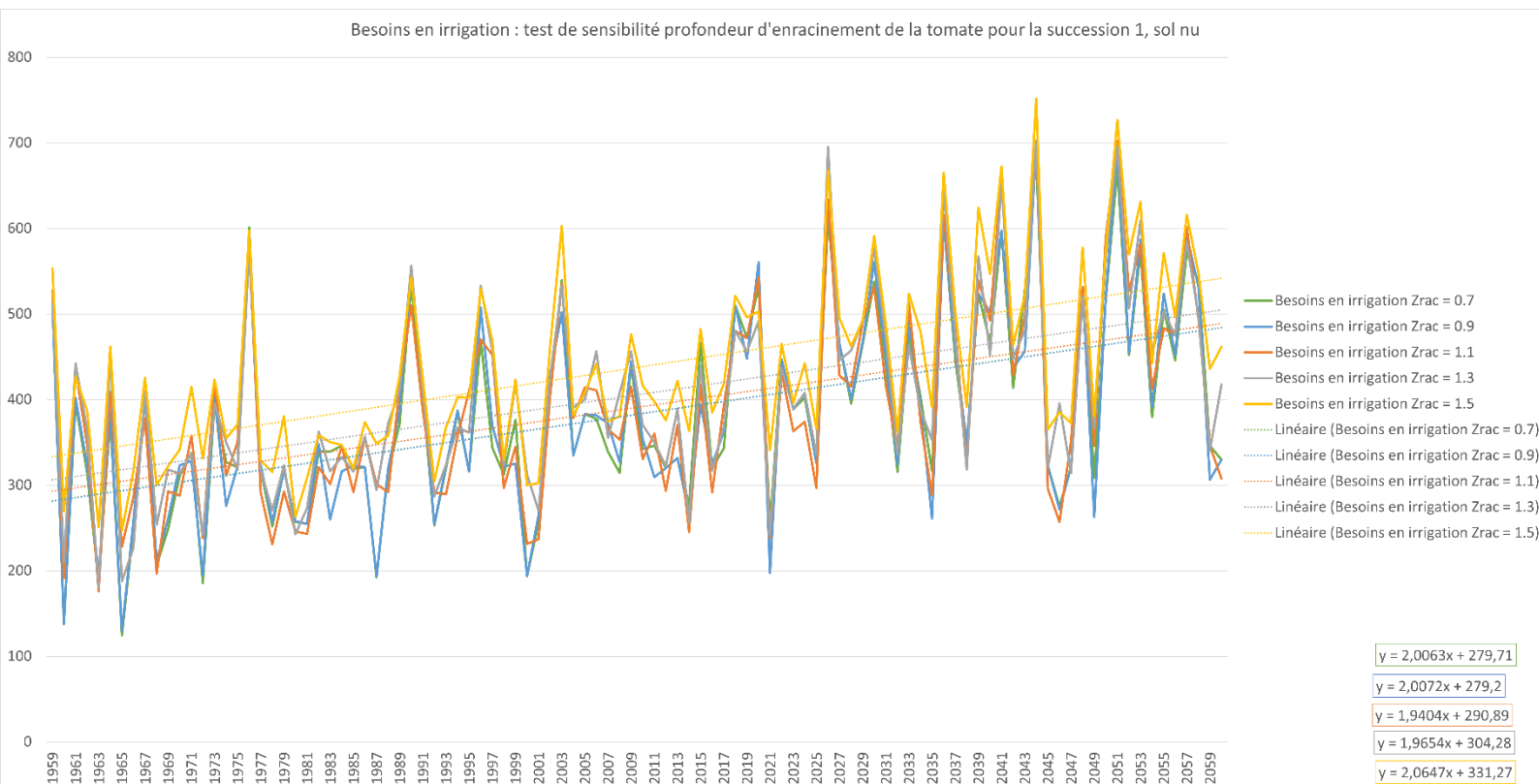
Le choix de la maille semble avoir un impact plutôt important pour sur la pente de la courbe tendancielle linéaire des besoins en irrigation. Le choix de la maille exerce aussi une influence sur l'ordonnée à l'origine des courbes linéaires tendancielle.

Cela s'explique par des différences notables de l'évapotranspiration potentielle calculée par Siclima pour les 3 mailles.

Comparaison précipitations et ETP pour 3 mailles pour la succession 1, sol nu



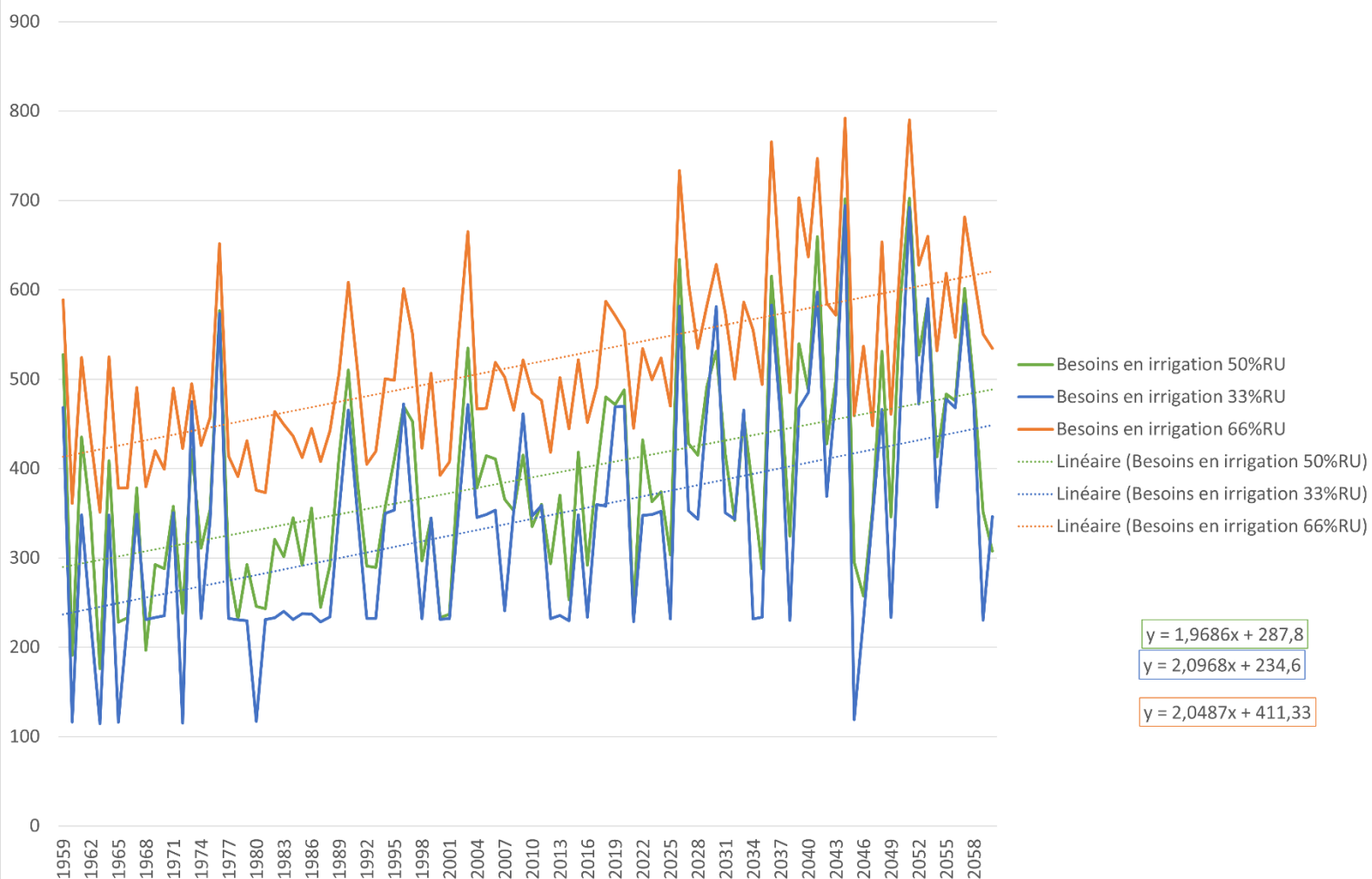
Annexe 3 : test sensibilité profondeur d'enracinement



La profondeur d'enracinement (Zrac) ne semble pas avoir un impact important pour sur la pente de la courbe tendancielle linéaire des besoins en irrigation. La profondeur d'enracinement exerce cependant une influence sur l'ordonnée à l'origine des courbes linéaires tendanciennes.

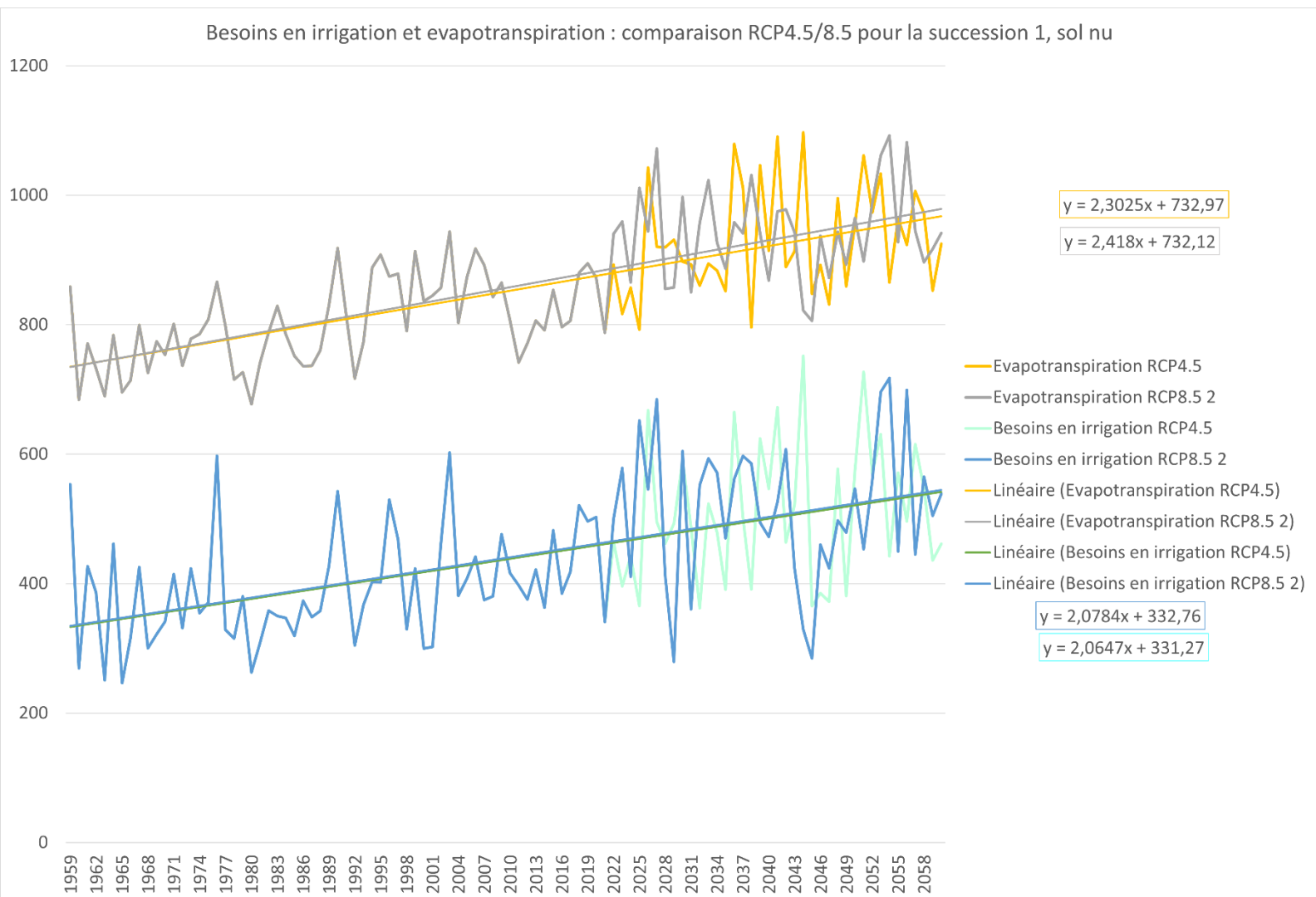
Annexe 4 : test de sensibilité seuil de RFU

Besoins en irrigation : test de sensibilité règle d'irrigation pour la succession 1, sol nu



Le choix du seuil de la RFU et donc la règle d'irrigation ne semblent pas avoir un impact important sur la pente de la courbe tendancielle linéaire des besoins en irrigation. Le choix du seuil de la RFU et donc la règle d'irrigation exercent cependant une influence notable sur l'ordonnée à l'origine des courbes linéaires tendanciennes.

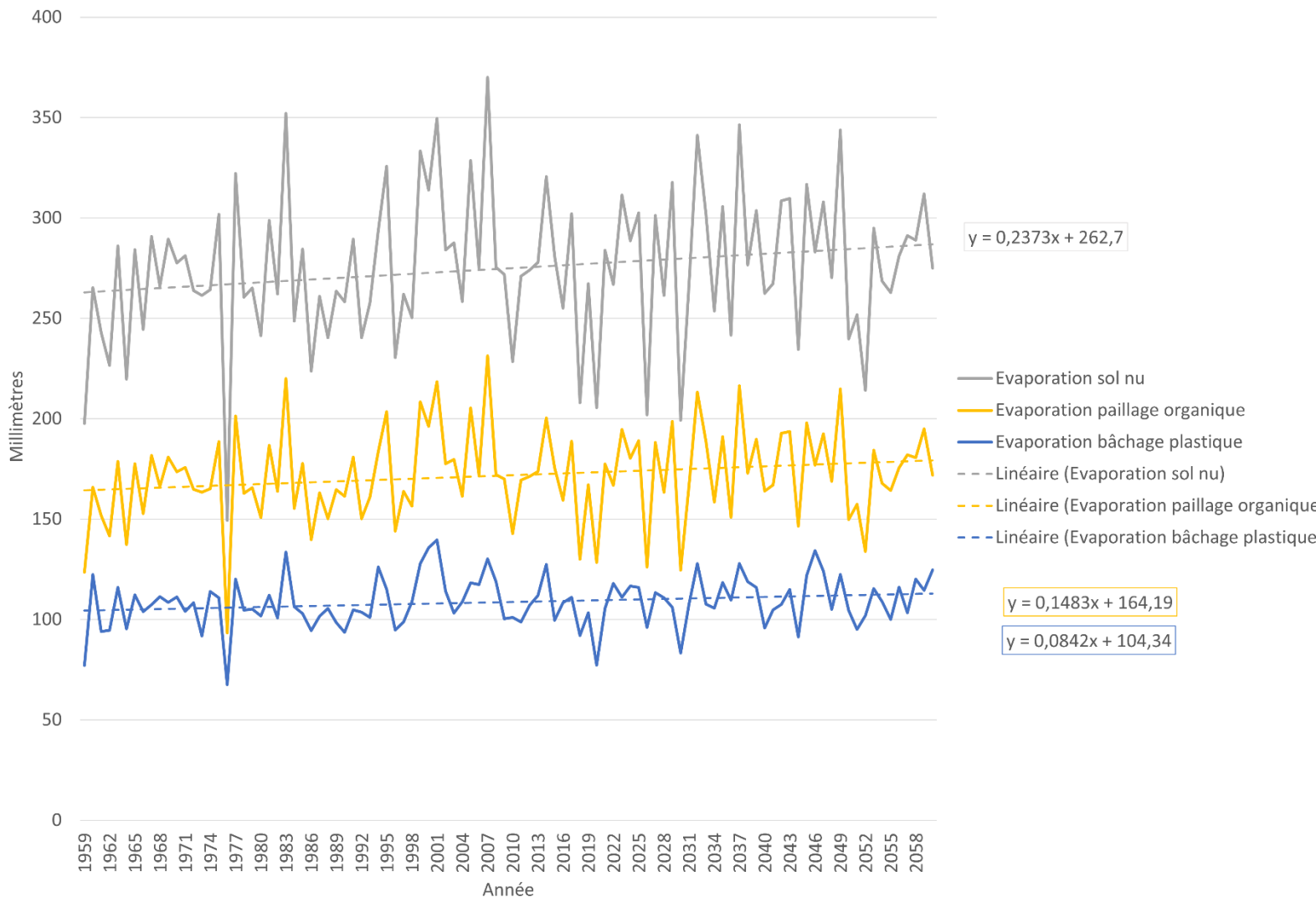
Annexe 5 : test de sensibilité RCP



Le scénario le plus pessimiste implique une très légère hausse de la pente de la courbe tendancielle des besoins en irrigation, jugée négligeable.

Annexe 6 : impact du couvert du sol sur l'évaporation

Evaporation pour la succession typique 2 : comparaison différents traitements du sol



Le couvert du sol exerce une grande influence sur l'évaporation de l'eau du sol.

Déclaration sur l'honneur contre le plagiat de Solenn Nguyen Vien, résidant à Kerudalar Bras, 29800, Trémaouézan, France, pour le mémoire « Maintien du maraichage dans un contexte de raréfaction de l'eau : étude de l'impact du changement climatique sur les besoins en irrigation du plateau de Saclay à l'horizon 2060 et perspectives », co-promu par Erwan personne et Nicolas Vereecken :

Je certifie qu'il s'agit d'un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie, de surcroît, que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets. Le non-respect de ces dispositions est passible de constituer un obstacle rédhibitoire à la validation de mon TFE et donc à l'obtention du diplôme convoité.

Le 11/06/2023,

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke extending to the right.