



HAL
open science

La raréfaction de la ressource en eau pour l'agriculture péri-urbaine: Situation actuelle et perspectives futures de la ressource en eau dans les systèmes maraichers et légumiers franciliens

Nabil Touili, Erwan Personne, Christine Aubry

► To cite this version:

Nabil Touili, Erwan Personne, Christine Aubry. La raréfaction de la ressource en eau pour l'agriculture péri-urbaine: Situation actuelle et perspectives futures de la ressource en eau dans les systèmes maraichers et légumiers franciliens. N°1, INRAE-SADAPT PARIS-SACLAY. 2023. hal-04336387v2

HAL Id: hal-04336387

<https://hal.inrae.fr/hal-04336387v2>

Submitted on 16 Dec 2023 (v2), last revised 20 Dec 2023 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Rapport de synthèse du Projet ClimaLeg-Eau

1ère Phase

La raréfaction de la ressource en eau pour l'agriculture péri-urbaine

Situation actuelle et perspectives futures de la ressource en eau dans les systèmes maraichers et légumiers franciliens



Le Projet ClimaLeg-Eau (1^{ère} Phase) a été financé par la Région (Plan France Relance) et le LabEx BASC



En collaboration avec l'association « Terre et Cité » du plateau de Saclay dans le cadre du PAT « De la Plaine aux Plateaux » et le BRGM



Auteurs : Nabil Touili, Erwan Personne, Christine Aubry
22/11/2023

Table des matières

Résumé.....	2
Introduction.....	5
1. Situation actuelle des prélèvements en eau	7
a) Résultats des enquêtes de terrain auprès des agriculteurs	7
b) Pilotage de l'irrigation	13
c) Source d'accès à l'eau et périodes critiques	14
d) Perspectives d'avenir face à une raréfaction de la ressource en eau.....	15
2. Modélisation de la disponibilité de l'eau souterraine à l'horizon 2060.....	18
a) Modélisation hydrologique au piézomètre de Saclay.....	19
b) Perspectives hydro-climatiques des niveaux d'eau au niveau du plateau de Saclay.....	21
3. Modélisation des besoins (additionnels) des cultures à l'horizon 2060	24
Conclusion	31

Résumé

Ce rapport présente une synthèse des résultats de la phase 1 du projet ClimaLeg-Eau (Adaptation des productions légumières et maraichères au changement climatique en Île-de-France- Eau). Ce projet s'inscrit dans la continuité du projet ClimaLeg (<https://www6.versailles-grignon.inrae.fr/sadapt/Focus/CLIMALEG>) (2021/2022). Parmi d'autres résultats, ce dernier a identifié la raréfaction de la « ressource en eau » comme un marqueur du changement climatique à l'échelle locale et un enjeu futur majeur pour les systèmes maraichers et légumiers franciliens. La raréfaction de l'eau fait référence à un rapport déficitaire entre « eau disponible » (offre) et « eau nécessaire » (besoins). Ce thème apparaît désormais au premier plan, compte tenu des stratégies régionales de (re)territorialisation de l'alimentation et de diversification agricoles à l'œuvre.

Au sein du périmètre du PAT (Projet Alimentaire Territorial) « De la plaine au Plateaux » (2022/2023), ClimaLeg-Eau se focalise sur la gestion actuelle et future de la ressource en eau dans les systèmes légumiers et maraichers franciliens situés au niveau de la plaine de Versailles et du plateau de Saclay. Ce rapport est une synthèse des 3 volets du projet, à savoir :

1. Situation actuelle en matière de prélèvements en eau et futures perspectives des agriculteurs.
2. Modélisation à l'horizon 2060 de la disponibilité de l'eau (d'irrigation) au niveau du piézomètre de Saclay.
3. Modélisation à l'horizon 2060 des besoins (additionnels) en eau des cultures.

Respectivement en lien avec ces 3 volets, des enquêtes de terrain auprès des agriculteurs, un travail de modélisation (par le BRGM) de l'eau souterraine disponible et une modélisation de l'évolution des besoins en eau des cultures/successions de cultures (par un stage) ont été réalisés.

Par une démarche territorialisée, les résultats du projet ClimaLeg-EAU (Phase 1) apportent des éléments réponses aux questions suivantes :

- Combien d'eau prélève-t-on (approximativement) à l'échelle de l'exploitation et qu'est-il envisagé par les agriculteurs dans un contexte de raréfaction de la ressource ?
- Quelles sont les tendances futures des niveaux d'eau de la nappe sur le secteur étudié à l'horizon 2060 ?
- De combien de volumes (supplémentaires) d'eau d'irrigation les besoins (par culture, par succession de cultures et en fonction de la couverture du sol) risquent-ils d'augmenter d'ici à 2060 ?

En lien avec l'objectif d'estimer/de quantifier les volumes en eau prélevés actuels et passés, nos résultats d'enquêtes indiquent :

- Une **faible visibilité** à l'échelle des exploitations agricoles interrogées sur leur propres prélèvements (passés et actuels) en eau ; Les données recueillies se caractérisent par une **faible précision et une forte hétérogénéité**.

- Les volumes annuels prélevés en années sèches (**max de 3571m³ /ha/an**) et humides **restent relativement faibles** à l'égard des données de références.
- Des perspectives de **multiplication (échelle de l'exploitation)** et de **généralisation (échelle du périmètre de l'étude)** de **bassins temporaires de captages/récupération de l'eau** sont envisagées par les agriculteurs.

Du point de vue des agriculteurs, l'accès aux eaux notamment souterraines, par des forages, est considéré comme indispensable si l'on souhaite au minimum maintenir les productions actuelles.

En lien avec l'objectif d'évaluer la disponibilité de l'eau souterraine à l'horizon 2060, une modélisation **préliminaire** et **exploratoire** du niveau de la nappe au piézomètre de Saclay¹ indique :

- Des premiers résultats **non concluants** à l'issue de la calibration du modèle GARDENIA Pluie-débit-niveau (au droit du piézomètre de Saclay) pour des **pas de temps saisonniers et annuels**.
- Des tendances à la baisse vis-à-vis de l'évolution future des niveaux d'eau de la nappe des sables et grès de Fontainebleau, à l'issue du modèle GARDENIA Pluie-niveau de nappe. Les incertitudes, liées aux modèles et aux futurs climatiques, **ne permettent pas de se prononcer de manière définitive sur ce point**.
- Des scénarios prospectifs (« *narratifs* » ou "*story-lines*") *issus du projet Explore 2*. **Deux des quatre « narratifs »** semblent indiquer une tendance à la baisse des niveaux d'eau au niveau du périmètre de l'étude.

En lien avec l'objectif d'estimer les besoins futurs des cultures à l'horizon 2060, nos résultats indiquent que :

- À l'échelle d'une exploitation maraîchère, les besoins en irrigation **en plein champ** devront faire face à une **hausse minimale de 17% à cultures/successions de cultures constantes d'ici moins de 40 ans**.
 - Les cultures importantes et prédominantes dans les systèmes maraichers et légumiers (de tomate, d'aubergine, de courgette, carotte et laitue) risquent d'observer, respectivement, des **hausse additionnelles** de besoins en eau (par cycle cultural et par ha) de l'ordre de 20 (laitue) à +85 mm (tomate) dans les **50 prochaines années**.
 - Les projections des 2 successions de cultures types étudiées indiquent une hausse significative des besoins en irrigation de l'ordre de **350 à 500 mm en 2060**.
 - Le **paillage organique** et la **bâchage plastique** permettent respectivement, une baisse de **22%** et de **40%** des besoins en irrigation d'ici 2060, par rapport à un sol nu pour la même culture.
- Ainsi, un maintien et *a fortiori* un développement (tels que souhaitables pour augmenter la sécurité alimentaire régionale) du maraichage et de la diversification légumière vont poser de façon nette la question des satisfactions d'une demande en eau supplémentaire : les modalités

¹ Réalisée par le BRGM (Bureau des Recherches Géologiques et Minières), partenaire du projet ClimaLeg-Eau

de ces rencontres offres-demandes ne sont pas directement du ressort de ce premier travail, par contre celui-ci semble rendre pertinente la recherche de solutions complémentaires aux modes d'irrigation actuels. Par ailleurs, appuyer les agriculteurs dans une meilleure connaissance et un meilleur partage de leurs données de consommations d'eau semble indispensable.

Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet ClimaLeg-Eau² (<https://www6.versailles-grignon.inrae.fr/sadapt/Focus/CLIMALEG-Eau>). Dans un contexte de changement climatique marqué par des variations dans les températures (moyennes, maximales et minimales), des contrastes inter-saisonniers accrus en matière de projections des précipitations et des hausses en fréquences et en intensité des événements climatiques extrêmes (canicules, sécheresses, inondations), l'adaptation des systèmes agricoles, légumiers et maraichers, s'avère particulièrement pressante. L'anticipation des impacts du changement climatique est d'autant plus urgente du fait de la nécessité actuelle de la transition agro-écologique et des politiques de résilience³ alimentaire marquées par la mise en place des PAT (Projets Alimentaires Territoriaux) et l'installation croissante d'agriculteurs souvent soutenus par les collectivités territoriales dans la périphérie parisienne. Cet objectif d'augmentation des cultures légumières et maraichères est inscrit dans le cadre de **la ceinture verte** prônée par le SDRIF-E de 2023 de la Région Ile de France⁴.

Ce rapport fait ainsi suite aux résultats du projet ClimaLeg en 2021/2022. Des ateliers participatifs ont alors été réalisés avec les acteurs (agriculteurs, associations locales, chambre d'agriculture, GAB Île-de-France) en déployant des données climatiques, territorialisées à fine échelle, issues des projections climatiques disponibles sur le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr>). À l'horizon 2060, les données climatiques montrent qu'avec des volumes annuels en termes de pluviométrie (globalement stables mais avec des contrastes inter-saisonniers accrus) en termes de pluviométrie, les précipitations hivernales ne permettront pas systématiquement de couvrir les **besoins futurs en eau** en raison des hausses prévues des températures et de l'évapotranspiration (printemps et été). En d'autres termes, le changement climatique futur entraînera une augmentation de la demande en eau en termes d'irrigation, sans évolution des pratiques.

La ressource en eau constitue donc à la fois un marqueur des impacts du changement climatique et un facteur d'adaptation pour les productions agricoles franciliennes, légumières et maraichères, étudiées. Ce constat a été l'un des plus importants retenus par les agriculteurs ayant participé à ClimaLeg, ce qui nous a conduit à ce projet ClimaLeg-Eau.

Ainsi, au vu de l'enjeu grandissant de la question de la ressource en eau, le principal objectif de CLIMALEG-Eau est d'estimer/évaluer les besoins supplémentaires en eau des systèmes légumiers et maraichers franciliens sous l'influence des impacts futurs du changement climatique. Dans cette première phase, nous nous sommes surtout concentrés sur le Plateau de Saclay (et secondairement les zones accolées : Plaine de Versailles et Triangle Vert du

² ClimaLeg-Eau (Adaptation des productions légumières et maraichères au changement climatique en Île-de-France) –Eau

³ Au sens sécurité (et non autonomie) alimentaire

⁴ In chapitre II, II.2.1 « Préserver les espaces agricoles franciliens et faire progresser l'autonomie alimentaire », SDRIF-E, 2023

Hurepoix) car nous voulions mener une étude territorialisée de ces besoins additionnels tenant compte au mieux des conditions pédoclimatiques, agricoles et hydrologiques locales

Sur un plan méthodologique, nous avons procédé en trois volets :

- A. Des enquêtes auprès d'agriculteurs pour mieux connaître (i) leurs actuels prélèvements en eau (sources d'eau, volumes, modes d'irrigation, problématiques rencontrées) pour leurs cultures et successions de culture dans leurs conditions pédoclimatiques (ii) analyser avec eux quelles seraient *a priori* leurs adaptations (modification de cultures, de modes de productions etc.) face aux potentielles raréfactions et/ou irrégularités d'accès à l'eau.
- B. Des projections de l'eau disponible à l'horizon 2060 au niveau de la nappe des sables et grès de Fontainebleau (plateau de Saclay), réalisée par le BRGM. Il s'agit de porter un regard sur la vulnérabilité potentielle de cette nappe face aux besoins (additionnels) en eau d'irrigation (issues des forages) pour les agriculteurs actuels, voire futurs.

Ce volet mobilise une modélisation hydrologique sur le bassin d'alimentation de l'Yvette à Villebon-sur-Yvette (12 mailles SAFRAN dont les numéros sont compris entre 1674-1679 et 1797-1802) et des données des projections climatiques (modèle du CNRM-CM5/ALADIN63 avec le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5). Des trajectoires climatiques *illustrant la diversité des futurs possibles* à travers des « narratifs » (ou "*story-lines*"), issues du projet *Explore 2*⁵, y sont également présentées.

- C. Des modélisations quantitatives par bilans hydriques des besoins (additionnels) en eau liés aux seules évolutions climatiques pour différentes cultures et successions de culture pertinentes par rapport au territoire étudié.

Ce volet déploie les mêmes données climatiques (modèle du CNRM-CM5/ALADIN63 avec le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5) en se concentrant sur le périmètre de Saclay (maille SAFRAN numéro 1679).

Ce rapport se conclut par des pistes de réflexion et de recherche visant à approfondir les résultats obtenus, à travers une (éventuelle) **phase 2 du projet ClimaLeg-EAU**, en se penchant sur les questions de la gouvernance territoriale de l'eau au regard des objectifs de résilience alimentaire et de la transition agro-écologique à l'œuvre.

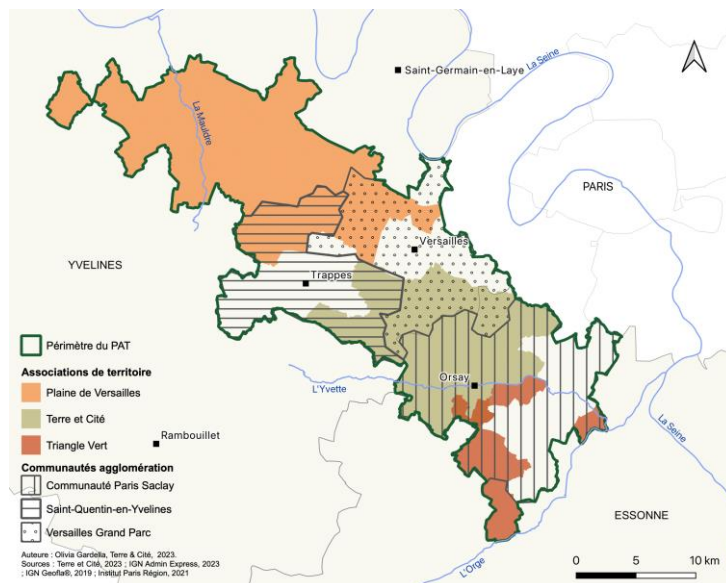
⁵ <https://webgr.inrae.fr/projets/projets-en-cours/explore-2/>

1. Situation actuelle des prélèvements en eau

a) Résultats des enquêtes de terrain auprès des agriculteurs

Dans l'objectif de réunir des données précises et actualisées sur les prélèvements en eau, des enquêtes de terrain ont été réalisées au niveau du périmètre de l'étude du territoire du PAT « de la Plaine aux Plateaux » (plateau de Saclay et plaine de Versailles, triangle Vert du Hurepoix) (**Figure 1**). Ces enquêtes ont visé un échantillon d'agriculteurs diversifiés, producteurs de légumes et maraichers situés pour tous sauf un dans le territoire.

Un total de **9 enquêtes** a été réalisé sur une liste préalable de **12 exploitations ciblées** ayant été sollicitées. Cet échantillon a été constitué sur la base du volontariat, par sollicitation téléphonique initiale à partir d'une liste fournie par la Chambre d'agriculture, Terre et Cité et le GAB île de France, sur le territoire du PAT. Ce total de 9 enquêtes, englobe un **agriculteur non irrigant** situé sur le périmètre du PAT. Ainsi, et compte-tenu de l'objectif fixé par nos enquêtes, le traitement des données sur les prélèvements n'a finalement concerné que les **8 agriculteurs irrigants (Tableau 1)**. Pour initier une réflexion sur d'autres conditions franciliennes d'accès à l'eau, nous avons inclus dans notre échantillon une exploitation située dans le département du 77 et dont les prélèvements en eau font l'objet d'une gestion territoriale spécifique (AquiBrie).



Ces enquêtes interviennent dans un contexte de manque de données sur la situation actuelle des prélèvements/consommations réelles en eau par cultures, par successions de cultures et sur les volumes annuels au sein des exploitations agricoles du territoire. À l'égard d'une raréfaction de la ressource en eau, ces enquêtes permettront de mieux se situer et pour partie de guider les estimations des besoins (additionnels) d'irrigation à l'horizon 2060 pour des cultures et successions de cultures pertinentes localement.

- Les données présentées ici ont fait l'objet d'un traitement anonyme conformément au guide d'enquête auprès des agriculteurs et des termes de confidentialité sur des relevés de compteurs.
- Ces enquêtes ont été menées en parallèle avec d'autres entretiens auprès des services techniques de la Chambre d'Agriculture et du GAB *Idf*, des associations locales, de la direction départementale (Yvelines) de l'alimentation et des circuits courts et de chercheurs du département AQUA d'INRAE.

Le **tableau 1** (ci-dessous) présente des informations générales sur les profils et les caractéristiques des exploitations concernées par nos enquêtes.

Tableau 1: profils et caractéristiques des exploitations/fermes concernées par les enquêtes

	Localisations géographiques	Dates d'installation	Surface maraichage / Surface totale	Nombre total des cultures /an	Modes d'irrigation	Modes de commercialisation	Types de sol	Sources d'accès à l'eau d'irrigation
Exploitation n°1	Plaine de Versailles	2020	- 1.5ha / 2.4 ha - 3000m ² sous abris	50 environ	- Goutte-à-goutte (90%) - Aspersion (10%) - Goutte-à-goutte	- AMAP - Vente directe - Bio	Limoneux	- Forage, - Bassin de rétention (2000m ³) des eaux de pluie - Eau de ville au démarrage du projet d'installation) pour l'irrigation
Exploitation n°2	Plaine de Versailles	2021	- 6500m ² / 2.2ha - 2500m ² sous abris	40 à 50	- Goutte-à-goutte - Micro aspersion	- Epicerie participative - Vente directe - Bio	Limoneux ?	- Forage, - Mare de récupération des eaux de pluies (360m ³)
Exploitation n°3	Plaine de Versailles	Reprise familiale	12ha/50ha	40 environ	- Aspersion en plein champs (enrouleur) - Goutte-à-goutte (pour les tomates sous serres uniquement)	- Vente directe - Marchés - Rungis - Bio	Argileux	- Eau superficielle (réserve collective d'eau de 4ha)
Exploitation n°4	Plaine de Versailles	Reprise familiale	- 45ha / 60ha - Tomates et concombres en sous abris	40 environ	- Goutte-à-goutte (90%) - Aspersion (10%)	Vente directe	limoneux	- Forage (3 forages à faible débit)
Exploitation n°5	Triangle vert	2019	- 2ha / 2 ha - 2000 m ² sous abris	30 à 40	- Goutte-à-goutte - Micro aspersion	- AMAP - Vente directe	Sablonneux	- Forage - Eau des toits de la grange
Exploitation n°6	Plateau de Saclay	2022	- 1.5 ha / 5ha (Pas de cultures en sous abris)	30 environ	- Goutte-à-goutte - Micro aspersion	- AMAP - Vente directe - Epicerie participative, restaurateurs et Coopératives Bio	Argilo-limoneux	- Eau de ville (en attente d'un accès au forage)
Exploitation n°7	Territoire de Aquibrie	- Reprise familiale	- 80 ha / 160 ha - Pas de cultures sous abris	- Salades (principalement)	Aspersion (sprinkler et pendulaire mobile)	- Rungis (50 %) - Centrales d'achat et grossistes (50 %)	Limoneux-sableux	- Forage (5 forages)
Exploitation n°8	Plateau de Saclay	- Ferme d'insertion	- 6.5ha/11ha - 7000m ² en sous abris	- Plus de 40	- Goutte-à-goutte - Aspersion	- Vente directe (paniers adhérents)	Argilo-limoneux	- Forage
Exploitation n°9	Triangle vert	- Reprise familiale	- 17ha/17ha (uniquement en plein champs)	- 40 environ	Non irrigant⁶	- Vente directe (marchés)	Argileux	-

⁶ Données non incluses dans nos traitements de données sur les prélèvements/consommations en eau

Le questionnaire d'enquête a comporté 5 principaux items. Il s'agit (i) des prélèvements/consommations en eau à l'échelle pertinente pour l'agriculteur (culture, unité de surface (ha), saisons, unité de temps annuelle, etc.), (ii) du pilotage de l'irrigation (iii) des sources d'accès à l'eau, (iv) des périodes critiques/besoins particuliers enregistrés par le passé et enfin (v) des solutions envisagées face à une raréfaction probable de la ressource en eau.

Dans cette partie du projet, nous avons comme ambition la quantification précise des prélèvements en eau des systèmes de productions légumiers et maraichers sur une échelle individuelle, celle de l'exploitation ou de la ferme, dans ce territoire. Elle visait à apporter des réponses, précises si possible, aux quantités d'eau prélevées/consommées en posant la question sous différentes formes : **Quels sont les volumes d'eau prélevés par cultures, par succession de cultures, par surface cultivée, par mode d'irrigation, en plein champ/sous abris et par saisons ?**

Nos enquêtes ont fait l'objet d'un processus itératif, tant pour reformuler les questions posées que pour accorder plus de temps aux personnes interrogées s'agissant de données quantitatives du passé (e.g. relevés des compteurs d'eau).

Principales cultures (ou succession de cultures)	Surfaces cultivées		Volumes d'eau apportés (temps x débit)/surface)	Saisons		Modes et fréquences d'irrigation	
				Humide	Sèche	Journalière	Hebdomadaire
1.	Plein champs						
	Sous abris						
Remarques							

Figure 2: un exemple d'une question de l'enquête sur les prélèvements actuels et passé en eau

L'analyse des données fait ressortir plusieurs points, principalement en lien avec la qualité (précision) des données disponibles et leur hétérogénéité (Figures 3 et 4).

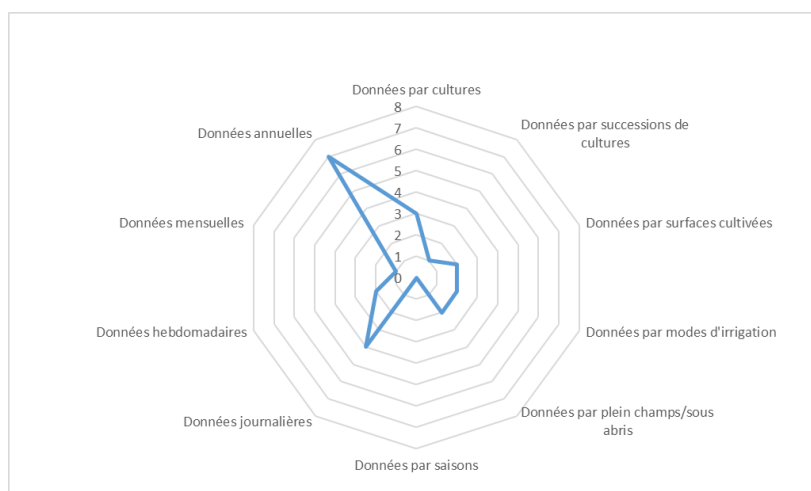


Figure 3: répartition des réponses des enquêtés en rapport avec les items du questionnaire d'enquête

Au mieux, les agriculteurs disposent des données annuelles de prélèvements/consommations⁷ d'eau de leur exploitation dans son ensemble. Seule la moitié de notre échantillon dispose d'informations sur les volumes journaliers d'irrigation, par cultures (dont 1 agriculteur seulement disposant de données par succession de cultures) : seules certaines cultures, notamment sous abris, permettent d'accéder à des données relativement précises auprès de 4 agriculteurs (**Figure 4**).

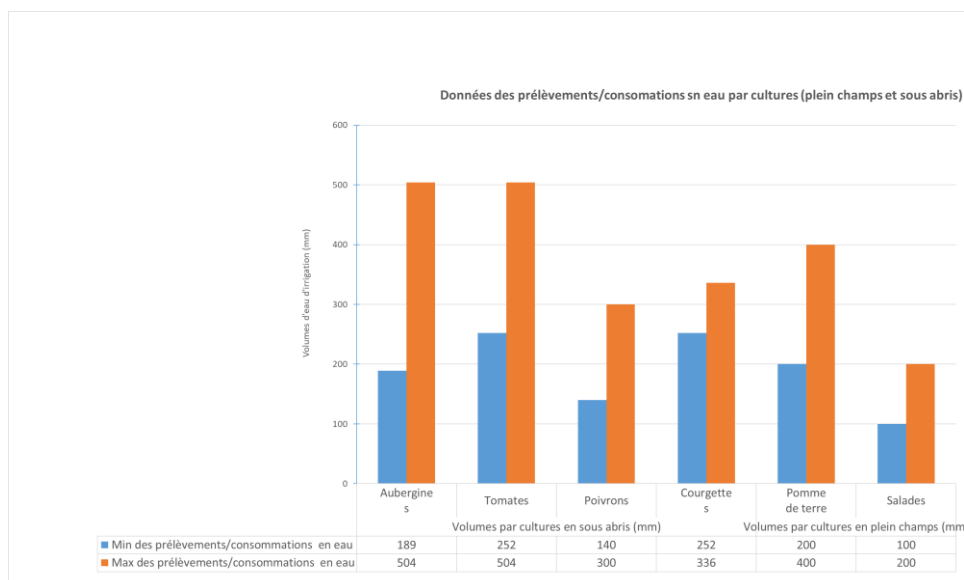


Figure 4: les volumes (maximaux et minimaux) prélevés/consommés en eau d'irrigation pour certaines cultures (plein champ et sous abris). Données recueillies auprès de 4 agriculteurs enquêtés à partir de leurs prélèvements sur plusieurs années (sèches/humides).

Cependant, une information relativement précise (**Figure 5**) existe sur les volumes annuels prélevés :

- Par volumes totaux annuels ;
- Pour des années sèches et humides.

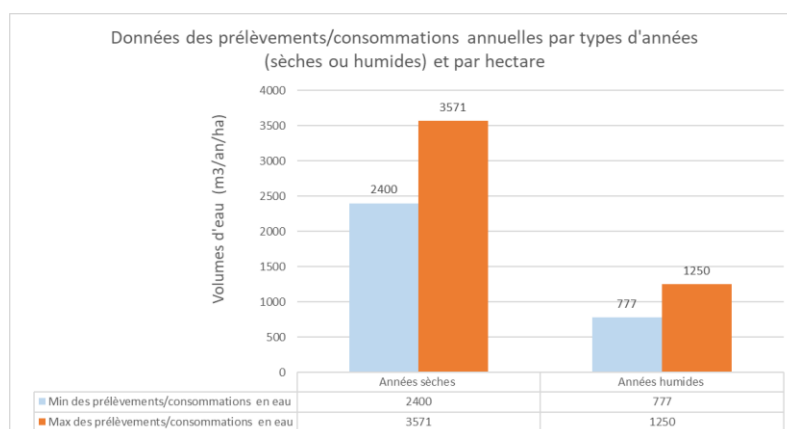


Figure 5: données des relevés annuels de compteurs d'eau recueillies auprès de 7 agriculteurs de notre échantillon

⁷ On fait l'hypothèse que l'eau prélevée équivaut à celle effectivement consommée via l'irrigation des productions légumières et maraichères (*a priori* peu de pertes).

La nouveauté de la « ressource en eau » comme un enjeu majeur associé au changement climatique explique en grande partie le manque d'information observé dans notre collecte de données.

Vis-à-vis de la qualité (en termes de précision) des données recueillies, plusieurs facteurs interviennent :

- ✓ D'abord, le nombre élevé des espèces cultivées et à cycles courts sur des surfaces relativement petites chez les petits producteurs maraichers, en comparaison avec les maraichers de plus grande taille qui peuvent être spécialisés sur un plus petit nombre d'espèces.
- ✓ Ensuite, la date d'installation des agriculteurs, souvent récente dans notre échantillon, explique aussi le manque de données observé. Mais ce phénomène est relativement fréquent dans la région pour les petites exploitations maraichères.
- ✓ L'aspect technique des systèmes d'irrigation, non automatisés pour la plupart, et le manque de compteurs secondaires (par parcelles ou par unités de surface de plein champ ou sous abris).
- ✓ Le raisonnement en soi des agriculteurs. La vision systémique adoptée dans le cas des systèmes maraichers et légumiers est plus cohérente avec des raisonnements sur des échelles annuelles qu'avec des raisonnements unitaires (par unité de surface et/ou par cultures). Les maraichers gèrent leur irrigation souvent toutes cultures confondues, en décidant d'un temps d'arrosage quotidien sur une surface donnée.

Sur la **variabilité des données** recueillies, on note des écarts dans les données recueillies auprès des agriculteurs ayant parfois :

- Un système de production relativement proche en termes de types de cultures et de modes de culture.
- Des caractéristiques structurelles elles aussi relativement similaires (types de sol, surfaces cultivées, etc.).

Cette grande variabilité reflète une forte hétérogénéité (ou diversité) des situations de chaque agriculteur, ou de leur perception de la situation. D'une part, un agriculteur récemment installé admet avoir irrigué moins que nécessaire, tant par crainte des coûts (d'usage provisoire de l'eau de ville⁸) que par désir de sobriété. Les écarts observés en termes de volumes annuels peuvent, d'autre part, s'expliquer par la diversité en matière :

- D'itinéraires techniques et des pratiques culturales (couverture des sols, paillages organiques/bâchage plastique, densités de semis/plantations, etc.).
- D'incitations/exigences en termes de précocité, de rendements, etc., suivant les modes de commercialisations (AMAP, restaurateurs locaux, épiceries participatives, marchés de Rungis, etc.) (**Tableau 1**).
- De sources d'accès à l'eau (forage, eau superficielle, exceptionnellement eau de ville) (**Tableau 1**).

⁸ L'eau de ville est un recours provisoire dans cette exploitation en l'attente de la mise en place des forages

- De débits variables (2 m³/h pour le plus bas et 25 m³/h pour le plus haut) des équipements de pompages relevés par nos enquêtes.
- Des critères de pilotage (voir sous-partie suivante) des agriculteurs.

La **Figure 4** résume les volumes d'eau relevés par année et par cycles de cultures. Pour en tirer des conclusions sur les prélèvements effectifs par culture, il est important d'intégrer des réflexions en termes de nombre de cycles par an de la culture sur une même parcelle (e.g., jusqu'à 6 cycles/an de salades contre 1 cycle/an de tomates) mais aussi en termes des cycles un peu décalés sur des parcelles différentes – d'où un étalement des besoins en eau à l'échelle de l'exploitation.

Les prélèvements observés ne reflètent pas forcément les besoins effectifs en eau. Les données recueillies, qui sont **globalement faibles**, en comparaison aux références d'irrigation qu'on trouve par exemple dans les documents de l'ITAB (Institut Technique en Agriculture Biologique) et de l'ARDEPI (*Association régionale pour la maîtrise des irrigations*), reflètent généralement les 2 dernières années au vu des dates d'installation de la majorité des structures concernées par cette enquête.

Les volumes d'eau d'irrigation relevés ici restent relativement faibles en comparaison avec les données de référence. La nouveauté du sujet « ressource en eau » explique en grande partie le manque de données observé chez les structures interrogées. Le manque de précision constitue un frein à surmonter pour des raisonnements plus pertinents en termes de volumes d'eau par kg produit, par durée d'arrosage, par densité de semis/plantations/m², par mois de l'année, par nombre de cycles ou encore par panier de produits commercialisés.

b) Pilotage de l'irrigation

Nos enquêtes relèvent un recours exclusif aux expertises personnelles dans le pilotage de l'irrigation. Dans l'échantillon interrogé, l'usage de matériels/instruments technologiques n'est pas jugé nécessaire (tableau 2). La décision d'irriguer ou non, des volumes d'eau et des fréquences d'irrigation, varie à la fois en fonction des stades de croissance des végétaux et des conditions associées au climat (**Tableau 2 ; Figure 6**).

Tableau 2: axes de pilotage de l'irrigation au sein de l'échantillon concerné par nos enquêtes

Expertises	Expertise personnelle	✓
	Expertise technologique de matériels/instruments (tensiomètre, calculateurs, etc.)	✗
Phénologie	Stades de croissance	✓
Conditions associées au climat	Etp, T°C, pluviométrie, humidité du sol, vents	✓

Dans la prise de décision, les facteurs les plus déterminants pour décider des volumes d'eau à apporter, de la fréquence et de la durée d'arrosage (suivant les débits) sont d'abord

l'évapotranspiration (ETP), puis l'humidité du sol appréciée au doigt et les températures⁹, suivis par la pluviométrie (en plein champ) et la vitesse des vents, tenant compte des stades de croissance des cultures en question.

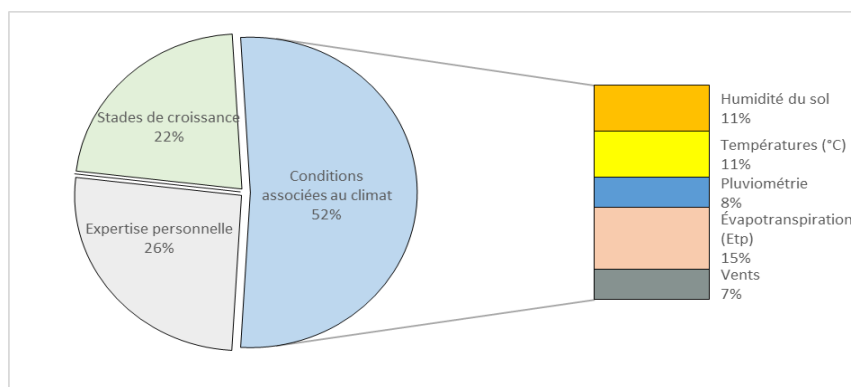


Figure 6: pourcentage des critères dans la prise de décision et le pilotage de l'irrigation

Les volumes d'eau apportés et les fréquences d'irrigation sont le résultat **d'arbitrages décisionnels** basés sur les **expertises personnelles** des agriculteurs à l'égard des données observées (e.g., humidité du sol par la méthode du doigt ou vitesse des vents) ou de prévisions météorologiques (e.g., bulletins météo d'ETP journaliers fournis par les services techniques de proximité ou par des abonnements à des structures privées).

c) Source d'accès à l'eau et périodes critiques

Selon nos enquêtes, l'accès à une source d'eau est une condition *sine qua non* pour s'installer en maraichage : même l'agriculteur non irrigant de notre échantillon reconnaît qu'il est dans des conditions pédoclimatiques particulières, non extrapolables à tous ses collègues. En plus des bassins de récupération des eaux pluviales (toitures de serres¹⁰ et de bâtiments), nos enquêtes indiquent que :

- Les forages représentent la principale source d'accès à l'eau d'irrigation.
- L'eau de ville constitue une source d'eau temporaire - dans l'attente d'un forage - pour les agriculteurs récemment installés.
- Les sources d'eaux superficielles, qu'elles soient individuelles ou collectives, sont très peu fréquentes. La réserve d'eau collective dans notre échantillon constitue une exception au sein du périmètre de l'étude à notre connaissance.

Les volumes d'irrigation **les plus élevés** ont été enregistrés en **2020, 2019 et 2003**, les années jugées **les plus sèches**, tandis que les volumes **les plus faibles** ont été enregistrés en **2021, 2016, 2012 et 2007**, les années jugées **les plus humides** par les agriculteurs interrogés.

* À noter que la notion d'année sèche et d'année humide ne se réfère pas à la seule pluviométrie annuelle du point de vue des producteurs maraichers : l'année 2016 jugée très

⁹ La température du sol a été évoquée par un seul agriculteur dans notre échantillon

¹⁰ Sauf pour les tunnels en chapelle

humide a enregistré un léger excédent pluviométrique, avec une canicule en août mais de fortes précipitations tardives qui coïncident avec les besoins en eau les plus critiques, ceux des cultures du printemps et de début d'été chez les producteurs maraîchers franciliens.

Toutes cultures et tous modes de production confondus, les **besoins en irrigation s'étalent de février/mars à octobre**. Les **périodes critiques** correspondent au **printemps-été**. La raréfaction en eau, pour des contraintes physiques (manque de la ressource) ou sociétales (par des normes/restrictions réglementaires) impliquerait des pertes de production¹¹ (si pendant le printemps) et de rendements des cultures en place (si pendant l'été).

Il convient de rappeler que les **cultures en sous abris/serres** qui, en règle générale représentent **moins de 10 %** de la surface totale cultivée, consomment **environ deux fois** plus d'eau d'irrigation/cultures/unités de surfaces.

d) Perspectives d'avenir face à une raréfaction de la ressource en eau

En cas de raréfaction¹² de la ressource en eau, un ensemble de solutions émerge de notre enquête. **Le captage des eaux souterraines (issues des forages) et/ou la récupération des eaux pluviales** représente les solutions dominantes pour les agriculteurs (**Tableau 3**). Il s'agit de bassins temporaires de report de l'eau, et **non de stockage d'eau** de longue durée. L'eau n'est pas seulement un facteur de production, mais aussi un facteur d'adaptation permettant d'apporter un rafraîchissement en cas de températures excessives (ou caniculaires) et un redoux en cas de fortes gelées.

¹¹ Des pertes à la levée / plantation obligeant (re)semer/(re)planter en décalant les cycles cultureux

¹² La raréfaction de l'eau fait référence à un rapport déficitaire entre « eau disponible » (offre) et « eau nécessaire » (besoins)

Tableau 3: solutions envisagées face à la raréfaction de la ressource en eau (% de l'échantillon signalant cette solution)

Solutions proposées	Solutions envisagées
Aménagement de bassins de captage/récupération d'eau	↑
Modes d'irrigation plus économes/efficaces	→
Pratiques culturales	→
Abandon de (certaines) cultures	↓
Introduction de (nouvelles) cultures	→
Adaptations variétales	→
Décalage des calendriers	↓
Réduction des surfaces irriguées	↓

Légende

- ↑ Si valeur $\geq 80\%$
- Si $33\% \leq \text{valeur} < 80\%$
- ↓ Si valeur $< 33\%$

En tête de liste des priorités, le captage de eaux souterraines /récupération des eaux pluviales est également une solution clé par rapport au reste des solutions envisagées. Viennent ensuite le perfectionnement des modes d'irrigation et des pratiques culturales plus économiques/efficaces, l'introduction de (nouvelles) cultures et de variétés plus adaptées à un contexte de raréfaction de l'eau. En bas de l'échelle des priorités se trouvent des solutions telles que l'abandon de (certaines) cultures et le décalage des calendriers ou encore la réduction des surfaces irriguées.

Nos résultats indiquent que :

- ✓ La première solution (captage/récupération des eaux) est déjà mise en œuvre à travers des bassins/mares de petites surfaces de l'ordre de **300 m³ à 800 m³**. Celles-ci jouent à présent le rôle de relais (nécessaires) de l'eau pour de très courtes périodes (quelques jours) afin de rendre l'eau pompée (en raison des faibles débits) disponible pour l'irrigation et de l'amener à la température ambiante.

Dans un contexte de raréfaction de l'eau, cette solution est envisagée par des aménagements de bassins, de cuves ou encore des silos¹³, étanchéifiés et à vocation de réserve d'eau, avec des volumes variables de l'ordre de **300 m³ à 800 m³** à remplir **2 à 3 fois par an**, et jusqu'à **10000 m³** dans le cas d'une grande exploitation de notre échantillon. Il reste à préciser avec les agriculteurs les proportions entre sources d'eau (eaux de pluie, eaux superficielles et eaux pompées dans la nappe) dans les

¹³ En respectant les terminologies utilisées par les agriculteurs interrogés

aménagements éventuels et les modes de gouvernance en cas de bassins non individuels.

- ✓ Le **100% goutte-à-goutte** n'est pas envisageable comme unique méthode d'irrigation. Il est plus envisageable dans le cas où on peut appliquer un bâchage pour les cultures à cycles longs. Une combinaison goutte-à-goutte et micro aspersion est jugée plus adéquate. L'automatisation de l'irrigation a été évoquée par un seul agriculteur en vue de gagner en efficacité par des irrigations nocturnes.
- ✓ Les pratiques de paillages plastiques et bâchage favorisent le maintien de l'**humidité** des sols et réduisent l'**ETP**, certes, mais elles présentent des **coûts additionnels économiques** (main d'œuvre et achats du produit manufacturé) et **sociaux** (de temps/pénibilité de travail) à internaliser. Plus les surfaces totales cultivées sont importantes, moins cette solution est envisageable sur la totalité de l'exploitation. De fait on ne la voit pratiquée actuellement dans notre échantillon que par les plus petites structures.
- ✓ L'abandon/introduction de (nouvelles) cultures est un **choix économique** qui répond aux exigences du marché et à la demande et aux **choix alimentaires du consommateur**. La résilience des systèmes maraîchers repose sur la multitude d'espèces cultivées, ce qui permet de compenser les pertes et les gains éventuels de rendement de chacune. En cas de raréfaction de l'eau, les cultures susceptibles d'être abandonnées sont soit celles à haute valeur commerciale mais haute consommation en eau, soit celles qui représentent des produits d'appel (e.g., pomme de terre) Cette optique explique la primauté des perspectives d'introduire de nouvelles cultures (fraises –qui existent déjà dans beaucoup d'exploitations sur la plaine de Versailles, melon et pastèques) sur celles d'abandonner (certaines) cultures. L'abandon de (certaines) cultures pourrait plus s'inscrire dans des **optiques de remplacement ou de substitution** (e.g., salades par des tomates/concombre) pour un choix écologique à condition d'être accompagnés par un choix économique et social, chez le consommateur.
- ✓ Les adaptations variétales représentent un **besoin en termes de recherche**.
- ✓ Le décalage des calendriers culturaux et la réduction des surfaces irriguées ne sont pas envisageables pour des **raisons économiques**.

Les solutions envisagées, et leurs priorisations, sont fortement influencées par les caractéristiques de notre échantillon avec une majorité d'agriculteurs récemment installés avec comme unique source d'eau l'accès aux forages, mais aussi par le contexte de l'étude, à savoir l'adaptation à un contexte de raréfaction de l'eau. Dans ce contexte, nos résultats soulèvent une tendance de multiplication (**échelle d'exploitation**) et de généralisation (**échelle du territoire**) des bassins **temporaires et individuels** de captage/récupération d'eau.

- Par bassins de captage/récupération des eaux souterraines et pluviales, on fait référence à des aménagements de bassins, de mares, de cuves ou encore des silos pour un report de l'eau d'irrigation.
- Cette **solution n'est pas récente en soi** ; certaines des structures interrogées disposent déjà de petites mares permettant la mise à disposition de l'eau pompée (en l'absence de débits importants) et sa mise à température ambiante.
- Ce qui est **nouveau**, c'est la **vocation de réserve d'eau** en cas d'une raréfaction de la ressource en eau avec :
 - o La perspective d'une multiplication du nombre de bassins (par exploitation) avec des volumes d'eau variables allant de **300 m³** à **10000 m³** (suivant les surfaces cultivées), et,
 - o La perspective de généralisation de cette solution à plus grande échelle.

L'eau n'est pas seulement un facteur de production, mais aussi un **facteur d'adaptation** et cette ressource est indispensable pour la résilience des systèmes maraichers et légumiers.

Les résultats de ce volet méritent d'être explorés avec un échantillon francilien plus diversifié d'agriculteurs (anciens et nouveaux), situés sur des territoires faisant l'objet d'une gestion spécifique de l'eau, et pour d'autres types de productions et de commercialisation (e.g., restauration collective). Sans prétendre à des conclusions exhaustives, les seules données de l'exploitation située dans la zone Aquibrie indiquent que les **eaux souterraines sont trop calcaires** pour envisager une irrigation au goutte-à-goutte, que l'aménagement de bassins est inenvisageable en raison de la **température élevée** de cette eau et que les eaux de ruissellement sont **de très mauvaise qualité** pour un usage irriguant. Ne pas avoir accès à des forages signifie pour cette exploitation un retour à la culture de céréales.

2. Modélisation de la disponibilité de l'eau souterraine à l'horizon 2060

En parallèle avec le volet 1, le BRGM a été sollicité comme partenaire du projet ClimaLeg-Eau, pour une étude de modélisation de l'état de la ressource en eau souterraine afin d'en produire des projections hydro-climatiques à l'horizon 2060. Une première phase test a ciblé le secteur de la commune de Saclay (91) par le piézomètre (BSS000RJMD) captant les sables et grès de Fontainebleau. La connaissance des niveaux d'eau souterraine (i.e. l'offre physique en eau) permettra de se projeter quant aux capacités potentielles d'irrigation¹⁴ à partir de la nappe pour le secteur agricole.

¹⁴ La contrainte sociétale liée à des réglementations d'accès à l'eau, de normes d'usage ou d'autres restrictions n'est pas incluse

a) Modélisation hydrologique au piézomètre de Saclay

Deux modèles hydrologiques globaux **GARDENIA** ont été développés sur le secteur de Saclay :

- Un modèle pluie-débit-niveau à l'échelle du bassin d'alimentation de l'Yvette à Villebon-sur-Yvette, et
- Un modèle pluie-niveau de la nappe au piézomètre de Saclay.

Suite au calage des deux modèles susmentionnés¹⁵, les critères statistiques obtenus sur le débit et le niveau de la nappe au piézomètre de Saclay ont permis de favoriser l'utilisation du **modèle pluie-niveau** pour l'élaboration d'une projection du niveau de la nappe à horizon 2060.

Pour la simulation du niveau de la nappe à horizon 2060, des données des projections climatiques (modèle du **CNRM-CM5/ALADIN63** avec le scénario de gaz à effet de serre **RCP4.5**)¹⁶ ont été introduites dans le modèle GARDENIA pluie-niveau de nappe sur la période 1975-2060. Ce travail s'est aussi appuyé sur **des données SAFRAN** (12 mailles SAFRAN dont les numéros sont compris entre **1674-1679** et **1797-1802**) (**Figure 7 et 8**) au pas de temps journalier (pluie liquide, neige (équivalent en eau des précipitations neigeuses), évapotranspiration potentielle, température de l'air moyenne).

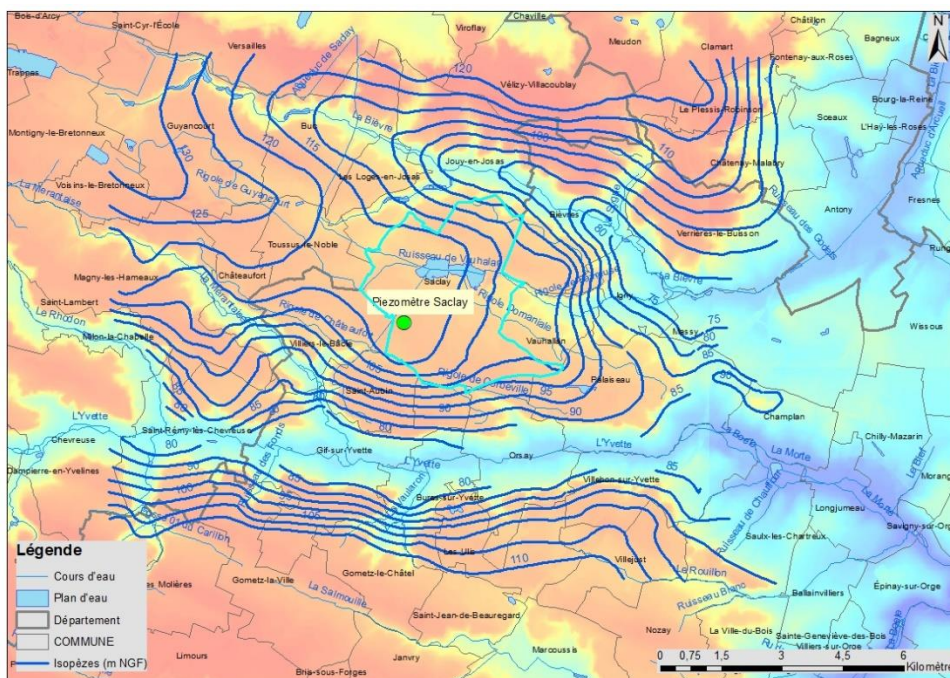


Figure 7 : esquisse piézométrique de la nappe des sables et grès de Fontainebleau centrée sur Saclay (Auteur : BRGM 1999)

¹⁵Modèles calibrés sur une période de 19 ans (2002-2020) avec une période d'initialisation longue pour tenir compte de la forte inertie de la nappe. Ces deux modèles ne prennent pas en compte les prélèvements d'eau dans la nappe et le cours d'eau.

¹⁶ Données journalières, issues de la plateforme SICLIMA développée par AgroClim-INRAE, couvrant la période 1975-2060, donc la période de référence (1976-2005) et la période où le modèle est forcé par le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5 (2006-2060).

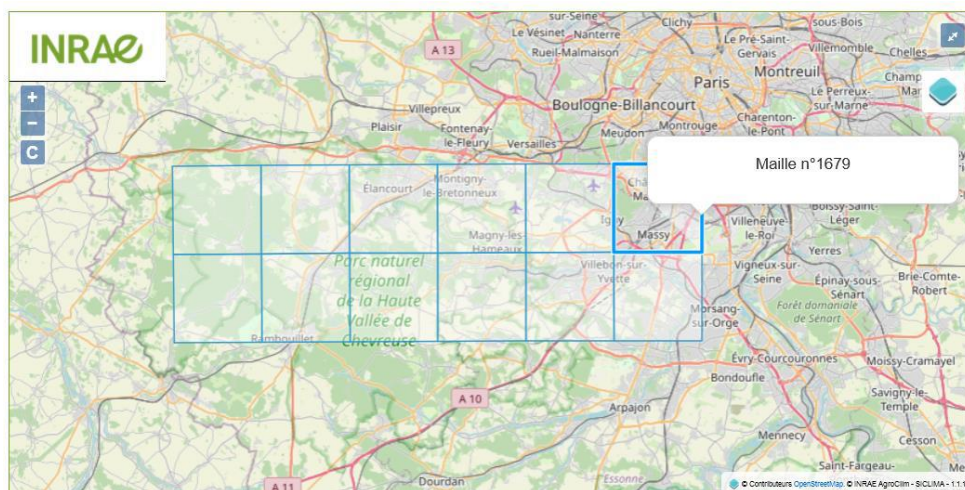


Figure 8: les 12 mailles SAFRAN prises en compte dans les tests de modélisation (capture d'écran de la plateforme SICLIMA (Système d'information de données climatiques maillées) développée par AgroClim-INRAE)

Les données climatiques indiquent que les précipitations futures ne changent pas de manière significative en termes de moyenne annuelle sur 30 ans à horizon 2060. En revanche, l'ETP augmente comparée à la période de référence, de 9% sur la plage temporelle 2006-2035 et de 16% sur 2026-2055. Cette augmentation est importante au printemps et en été, ce qui correspond aux périodes critiques (section 1 plus haut), et risque d'augmenter les demandes en eau pour les plantes et par conséquent les prélèvements en eau dans les eaux de surface et souterraines.

Le rapport du BRGM indique que l'utilisation du modèle GARDENIA forcé par les projections climatiques (précipitations liquides et neigeuses, ETP et température moyenne) a permis de calculer une projection du niveau de la nappe au piézomètre de Saclay à horizon 2060 (**Figure 9**). Cette simulation s'appuie sur les données climatiques en utilisant le modèle du CNRM-CM5/ALADIN63 avec le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5. Pour cette simulation, on constate une tendance à la baisse du niveau de la nappe (**Figure 9**). En raison des incertitudes associées au climat, il **n'est néanmoins pas pertinent de confirmer cette évolution** sur la base d'une seule projection.

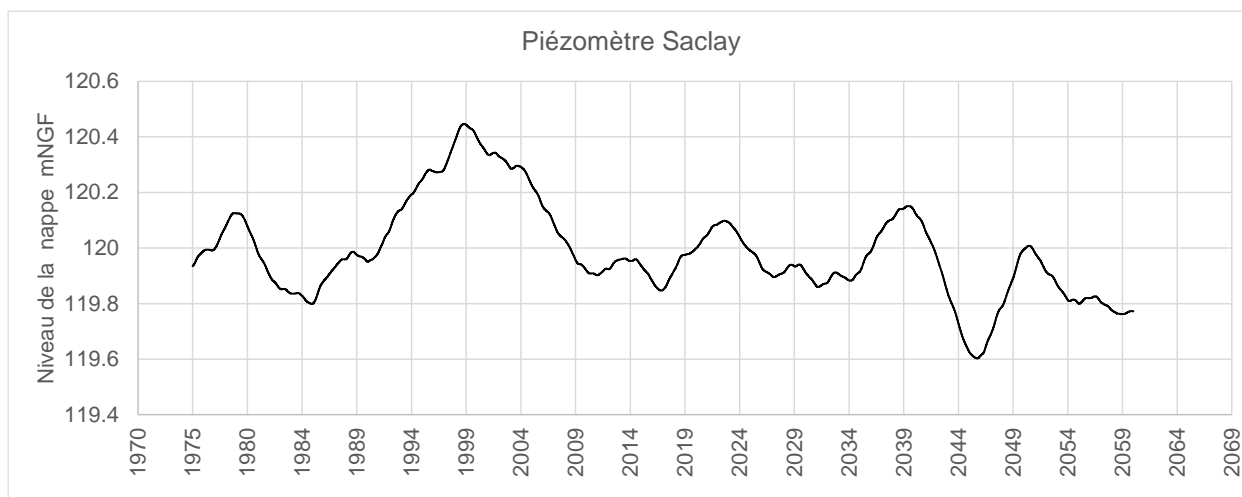


Figure 9: projection du niveau de la nappe au piézomètre de Saclay à horizon 2060 résultant de la projection climatique du modèle CNRM-CM5/ALADAIN63 – RCP4.5 (Drias-2020) (Auteur : BRGM 2023)¹⁷

L'étude du BRGM conclue que l'approche reste exploratoire vu que :

- Le modèle est calibré sur une courte période d'observation au regard de la dynamique interannuelle de la nappe, et
- L'utilisation d'une seule projection climatique issue d'un couple GCM/RCM utilisant le scénario de gaz à effet de serre RCP 4.5 ne permet pas de conclure sur les tendances. L'incertitude sur les projections climatiques liée aux modèles de circulation générale (GCM) mais également aux modèles régionaux de climat (RCM) utilisés pour la descente d'échelle est importante.

Ces résultats ne permettent pas de remplir nos objectifs (peut être trop) ambitieux d'avoir des projections des niveaux d'eau sur des pas de temps saisonniers et annuels d'ici 2060.

Il convient de souligner que cette simulation ne prend pas en compte les prélèvements d'eau dans la nappe et le cours d'eau. Ceux-ci risquent d'augmenter pour le secteur maraicher/légumier, d'où l'intérêt d'estimer/évaluer conjointement l'évolution des besoins futurs des cultures.

b) Perspectives hydro-climatiques de l'évolution des niveaux de nappes d'eaux souterraines au niveau du plateau de Saclay

Compte tenu des résultats peu concluants susmentionnés, pour se prononcer sur les tendances du niveau de la nappe, des données du **projet Explore2** (portail DRIAS-Eau) ont été exploitées grâce à une **autorisation d'accès exceptionnelle pour usage interne dans le cadre du projet ClimaLeg-Eau**¹⁸. Le traitement de ces données de projections¹⁹ laisse entrevoir **4 projections**

¹⁷ Amraoui N., Neveux A. 2023. Modélisation GARDENIA de la chronique du piézomètre de Saclay BSS000RJMD, BRGM/RP-72788-FR. Rapport final V2.

¹⁸ Autorisation accordée par M. Eric Sauquet (AQUA/INRAe) et transmission des données de projection EXPLORE2 pour le secteur de Saclay par M. Jean-Pierre Vergnes (BRGM). Qu'ils en soient tous deux vivement remerciés.

¹⁹ Simulations avec le scénario 8.5, contrastées en fin de siècle, en cohérence avec les narratifs du projet Explore2.

climatiques contrastées (ou « narratifs ») de l'évolution de l'eau de la nappe au niveau du périmètre de l'étude :

- Narratif 1 : Fort réchauffement et fort assèchement d'eau.
- Narratif 2 : Changement futurs relativement peu marqués.
- Narratif 3 : Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations.
- Narratif 4 : Réchauffement marqué et augmentation des précipitations.

Les Figures 10, 11, 12 et 13 présentent les conséquences de ces 4 narratifs²⁰ au niveau du secteur Saclay. À l'horizon 2060, des tendances à une baisse (plus ou moins régulière) des niveaux d'eau sont observées dans 2 des 4 scénarios prospectifs, ainsi qu'une tendance de quasi-stagnation et d'une légère hausse dans les deux autres.

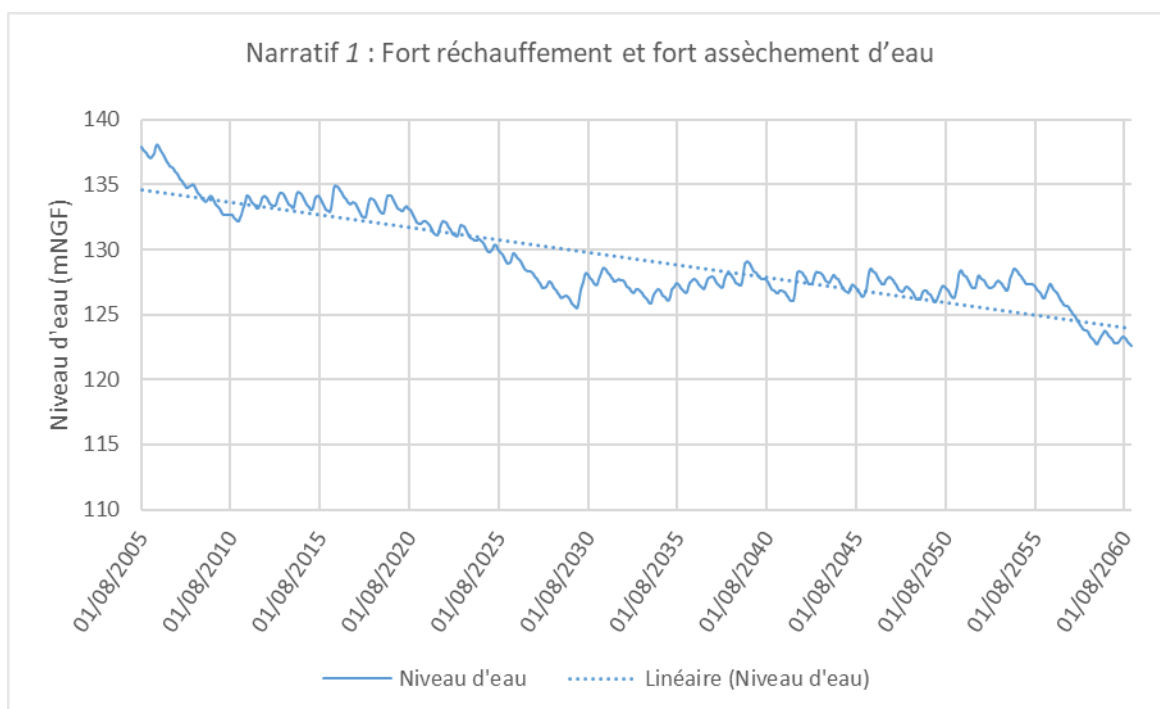


Figure 10: simulations du niveau de la nappe sur le plateau de Saclay "modèle ICHEC-EC-EARTH_MOHC-HadREM3-GA7-05_ADAMONT-France avec scénario 8.5" (DRIAS2020)

²⁰ Sorties de données en grilles mensuelles à la maille correspondante au point d'eau du Piézomètre du CEA (Saclay - 91) : BSS000RJMD (02184X0099/F48) aux coordonnées X,Y (Lambert 93) : X : 637490 / Y : 6848121 (m NGF) de la fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?Code=02184X0099/F48#general>

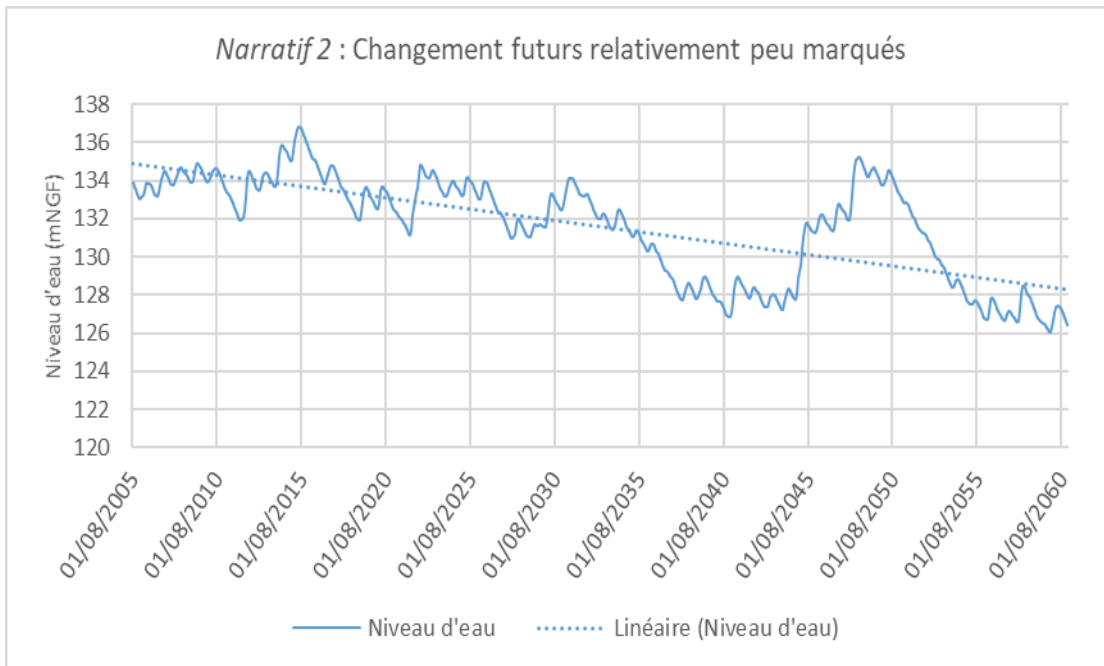


Figure 11: simulations du niveau de la nappe sur le plateau de Saclay "modèle CNRM-CM5_CNRM-ALADIN63_ADAMONT-France avec un scénario 8.5" (DRIAS2020)

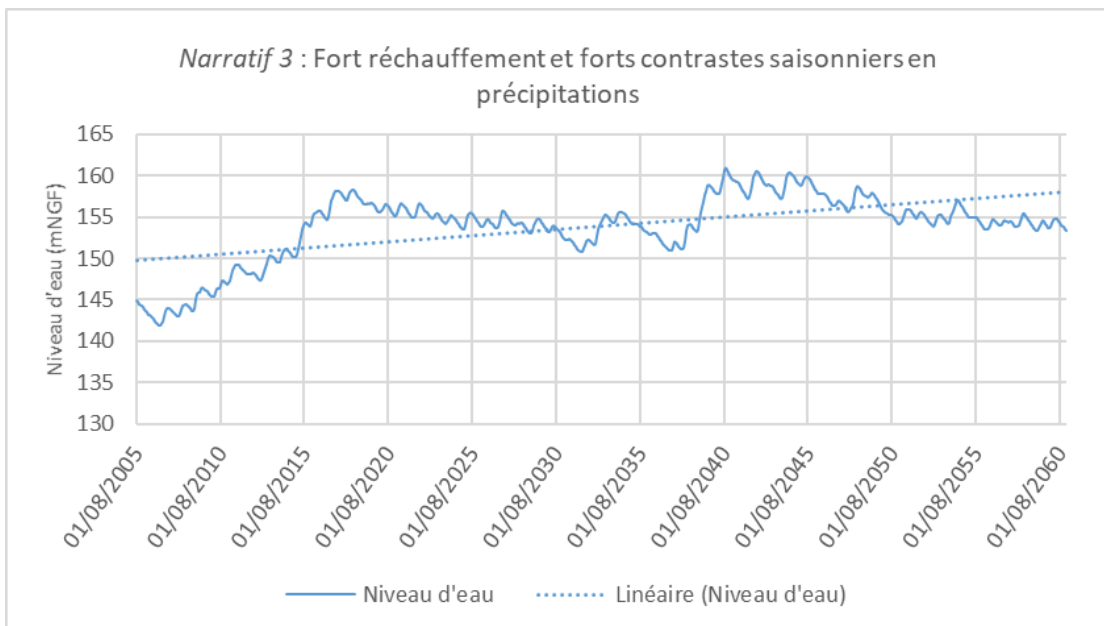


Figure 12: : simulations du niveau de la nappe sur la plateau de Saclay "modèle HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17_ADAMONT-France avec un scénario 8.5" (DRIAS2020)

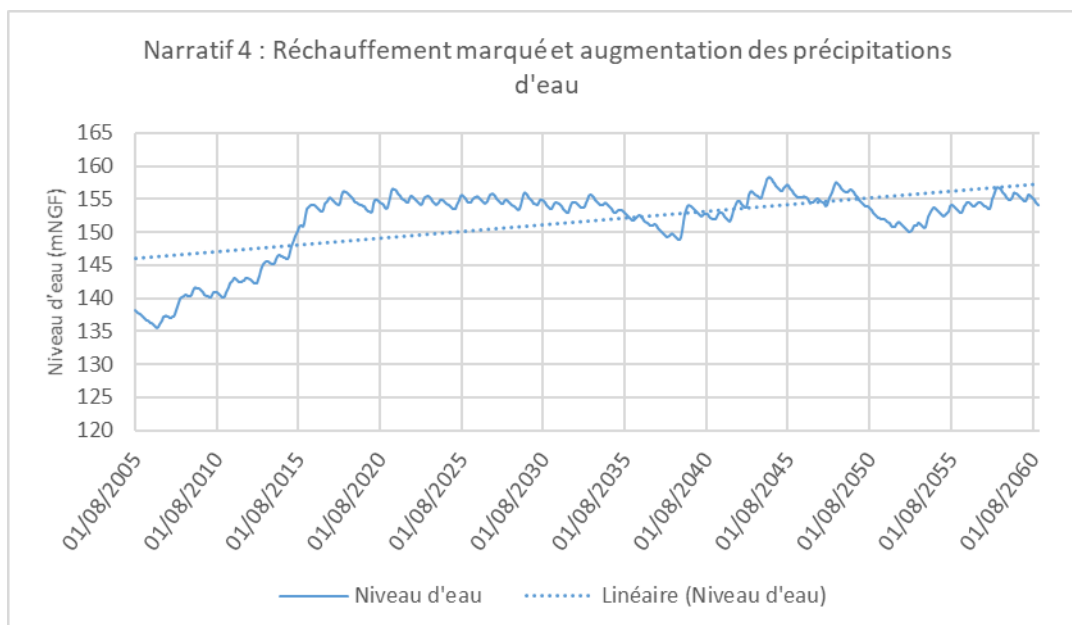


Figure 13: simulation du niveau de la nappe sur le plateau de Saclay (modèle HadGEM2-ES_CNRM-ALADIN63_ADAMONT-France avec le scénario 8.5" (DRIAS2020)

Ces projections contrastées de l'évolution des niveaux de nappes d'eaux souterraines devraient amener à réfléchir à des sources alternatives d'eau pour l'irrigation agricole dans le futur. Il n'en demeure pas moins que ces projections considèrent **des prélèvements/consommations constants** en eau à l'horizon 2060. Ces résultats méritent d'être analysés en parallèle avec les évolutions des besoins (bilans hydriques) des cultures à l'horizon 2060 ainsi, à terme, qu'avec des évolutions des **assolements en cultures légumières et maraichères dans le cadre des évolutions de systèmes alimentaires régionaux.**

3. Modélisation des besoins (additionnels) des cultures à l'horizon 2060

Dans le cadre d'un stage réalisé à INRAE (UMR SADAPT et ECOSYS), un modèle paramétrable de bilan hydrique a été développé en s'appuyant sur des données climatiques SAFRAN et des données des projections climatiques à l'horizon 2060, issues de la plateforme Siclima (Nguyen Vien, 2023)²¹. Ce modèle s'est limité à une maille SAFRAN (1679) pour le plateau de Saclay (Figure7). Tout d'abord, des simulations des besoins en eau sont réalisées à travers le calcul de l'évapotranspiration pour 5 cultures importantes dans les systèmes légumiers et maraichers sur le périmètre de l'étude. Des simulations des besoins en eau sont ensuite réalisées pour 2 successions de cultures types.

²¹ Nguyen Vien S, 2023. Maintien du maraîchage dans un contexte de raréfaction de l'eau : Etude de l'impact du changement climatique sur les besoins en irrigation du Plateau de Saclay à l'horizon 2060 et Perspectives. Mémoire de fin d'études, Université de Liège Gembloux AgroBio Tech, 48 pages plus annexes. Stage Rapport financé dans le cadre du projet ClimaLeg-Eau à AgroParisTech (UMR Ecosys et Sadapt)

Le calcul des bilans hydriques s'est basé sur l'approche de la FAO No.56²² par le calcul par double coefficient de l'évapotranspiration (cf. ci-dessous). Les données climatiques utilisées recouvrent le passé (1960-2021), données réactualisées en continu par Météo-France, et les projections futures (horizon 2060) à travers le même modèle que celui du volet 2 du projet, à savoir le modèle CNRM-CM5/ALADIN 63 et le scénario RCP 4.5 disponible sur le portail Siclima²³.

Le modèle développé calcule l'ETM (l'évapotranspiration maximale) à partir des données de l'ETP (disponibles sur la plateforme Siclima) à travers l'équation suivante :

$$ETM=(Ke+Kcb)*ETP$$

Les coefficients Kc étant connus pour les différentes cultures, le calcul des bilans hydriques a intégré alors les deux coefficients : le coefficient (Kcb) comme *coefficient de transpiration de la culture*, variant selon les stades de croissance de la plante, et celui l'évaporation (Ke) comme *coefficient d'évaporation du sol*. En fonction de l'évolution de la réserve utile en eau du sol (données pluviométriques disponibles), le modèle produit au final des évolutions des besoins optimaux en eau d'irrigation (sorties de l'ETM).

Le choix des cultures et des successions des cultures s'est effectué de **façon experte** mais en cohérence avec les résultats du volet 1 du projet, pour la modélisation des besoins en eau d'irrigation. Uniquement pour les cultures de plein champ, le modèle développé a permis d'estimer :

- Des besoins optimaux en eau d'irrigation pour 5 cultures²⁴ (la tomate, l'aubergine, la courgette, la carotte, la laitue) à l'horizon 2060
- Des besoins optimaux en eau d'irrigation pour 2 successions types de cultures (**Figure 14**)
 - Succession type 1 : Laitue, tomate, radis (sur une année)
 - Succession type 2 : Laitue, laitue, poireau (année 1) et laitue radis, carotte (année 2)

La succession 1 (infra annuelle) donne une **place centrale** à la culture de la tomate, culture gourmande en eau mais très demandée, comme le font beaucoup d'exploitations maraichères sur tout ou partie de leur surface. **La succession 2** (sur 2 ans) intègre deux cultures à **cycle long**, Poireau et Carotte.

Par ailleurs, vu la fréquence de **pratiques de paillage ou couverture du sol** dans les exploitations de petite taille, on a choisi de simuler des besoins optimaux en eau d'irrigation selon la

²² 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).

²³ Données journalières des températures minimales, maximales, moyennes [°C], de l'humidité relative de l'air [%], des précipitations totales [mm], de la vitesse du vent à 10m [m/s] et de l'évapotranspiration potentielle calculée par Siclima [mm].

²⁴ Sur les périodes suivantes : Tomate (15 mai au 12 septembre), aubergine (15 mai au 27 septembre), courgette (15 mai au 27 septembre), carotte (1er mars au 29 juin) et laitue (1 juin au 6 juillet).

couverture de sols : sol nu, avec paillage organique et avec bâchage plastique²⁵ à l'horizon 2060.

Figure 14: successions types 1 et 2 prises en compte dans les calculs des besoins en eau d'irrigation

Succession type 1	1 année		
	Laitue	Tomate	Radis
	1 ^{er} mars au 30 avril	15 mai au 30 septembre	01 octobre au 10 novembre

Succession type 2	Année 1		
	Laitue	Laitue	Poireau
	1 ^{er} mars au 30 avril	5 mai au 4 juillet	10 juillet au 07 décembre
	Année 2		
	Laitue	Radis	Carotte
1 ^{er} mars au 30 avril	1 ^{er} mai au 31 mai	1 ^{er} juin au 28 novembre	

Les principaux résultats de ce travail de modélisation indiquent clairement une **augmentation des besoins** en irrigation pour les cultures concernées. Cette hausse des besoins est plus prononcée pour les cultures à cycle long, telles que la tomate et les aubergines. Pour les cultures à cycle court comme la laitue, la hausse reste très significative si on considère le nombre potentiel de cycles par an (e.g., laitue).

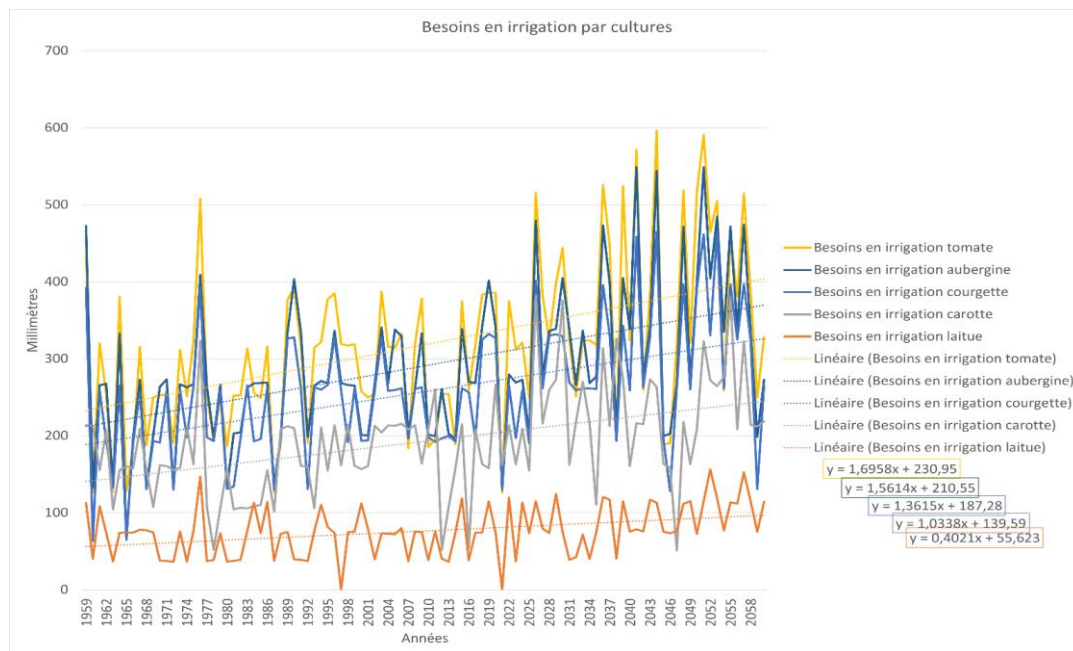


Figure 15: projections des besoins en irrigation des cultures (tomate, aubergine, courgette, carotte, laitue) entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay (Nguyen Vien, 2023)

Le **Tableau 4** traduit les résultats de la **Figure 15** sous forme d'indicateurs des besoins (additionnels) en eau d'irrigation sur différentes échelles temporelles, pour envoyer des

²⁵ Détail dans la partie C, chapitre 10 (p195-198) du document « FAO irrigation and drainage paper, n0. 56 »

messages plus pertinents. Les besoins additionnels à prévoir s'avèrent désormais considérables pour certaines cultures (notamment tomate, aubergine, et courgette), sans oublier le nombre de cycles/an à prendre en considération pour d'autres cultures (exemple de la laitue).

Tableau 4 : projections des besoins en eau d'irrigation par an, sur 50 ans et à l'échelle d'un siècle

	Besoins additionnels en eau d'irrigation / cultures		
	Par cycle	Sur 50 ans	Sur 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	+ 1.0 mm	+ 50 mm	+ 100 mm
Laitue	+ 0.4 mm	+ 20 mm	+ 40 mm

En ce qui concerne les successions des cultures 1 et 2, la **Figure 16** (ci-dessous) présente des projections des besoins en irrigation à l'horizon 2060. Cette figure indique des hausses des besoins pour les deux successions avec une hausse particulièrement prononcée pour la succession type 1. Cette dernière présente des besoins élevés en eau d'irrigation mais reste dans l'intervalle des volumes annuels supérieurs (**357.1 mm**) relevés par nos enquêtes de terrain dans le volet 1 du projet ClimaLeg-Eau (**Figure 5**). Cette succession-type est, avec adaptations, généralement pratiquée dans les systèmes maraichers du périmètre de l'étude.

Les résultats de ce modèle montrent, à travers les projections des 2 successions types, une évolution significative allant de besoins en irrigation de l'ordre de **200 à 300 mm/ha/an** en **1960** vers des besoins, de l'ordre de **350-500 mm** en **2060**. À l'échelle du siècle, une hausse relative des besoins en irrigation de **75%** est prévue pour la **succession 1**, et de **67%** pour la **succession 2**.

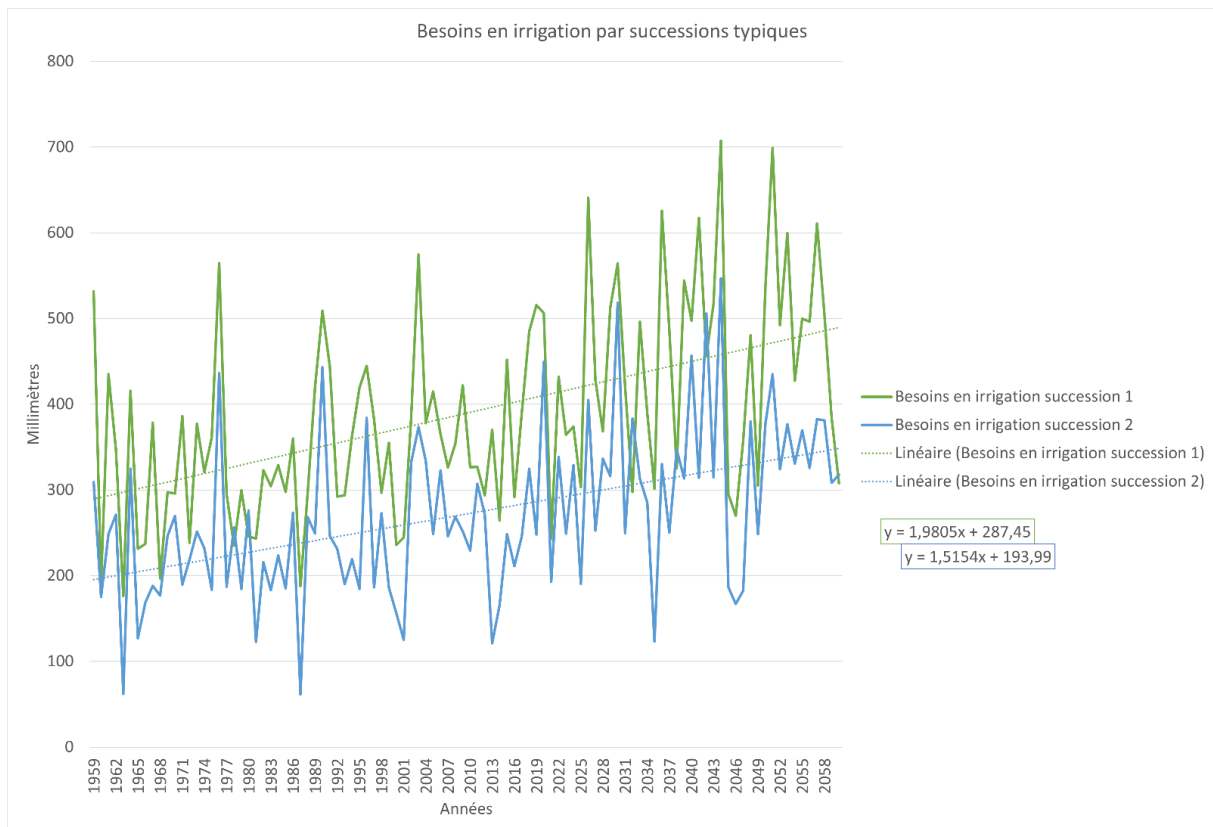


Figure 16: : projections des besoins en irrigation pour les successions type 1 et 2 entre 1960-2060 sur le plateau de Saclay (Nguyen Vien, 2023)

Si l'on raisonne en termes de besoins additionnels, entre 2023 et 2060 :

- La succession type 1 conduira à une **hausse d'environ 20%** des besoins en eau.
- La succession type 2 conduira à une **hausse d'environ 17 %** des besoins en eau.

À l'échelle d'une exploitation maraîchère, il est ainsi possible de déduire que les besoins en irrigation en plein champ risquent une hausse minimale de 17% dans moins de 40 ans. On tient à rappeler que ces conclusions restent fortement conditionnées par les données du modèle CNRM-CM5/ALADIN 63 choisi, et qui incarne des changements futurs relativement peu marqués. Il est ainsi à craindre que ces besoins en eau supplémentaires ne soient de fait supérieurs si les changements sont plus forts que ce scénario.

La comparaison des effets des pratiques de couverture ou non du sol apparait aussi intéressante (simulations faites sur la base des références FAO pour paillage organique ou bâchage plastique)

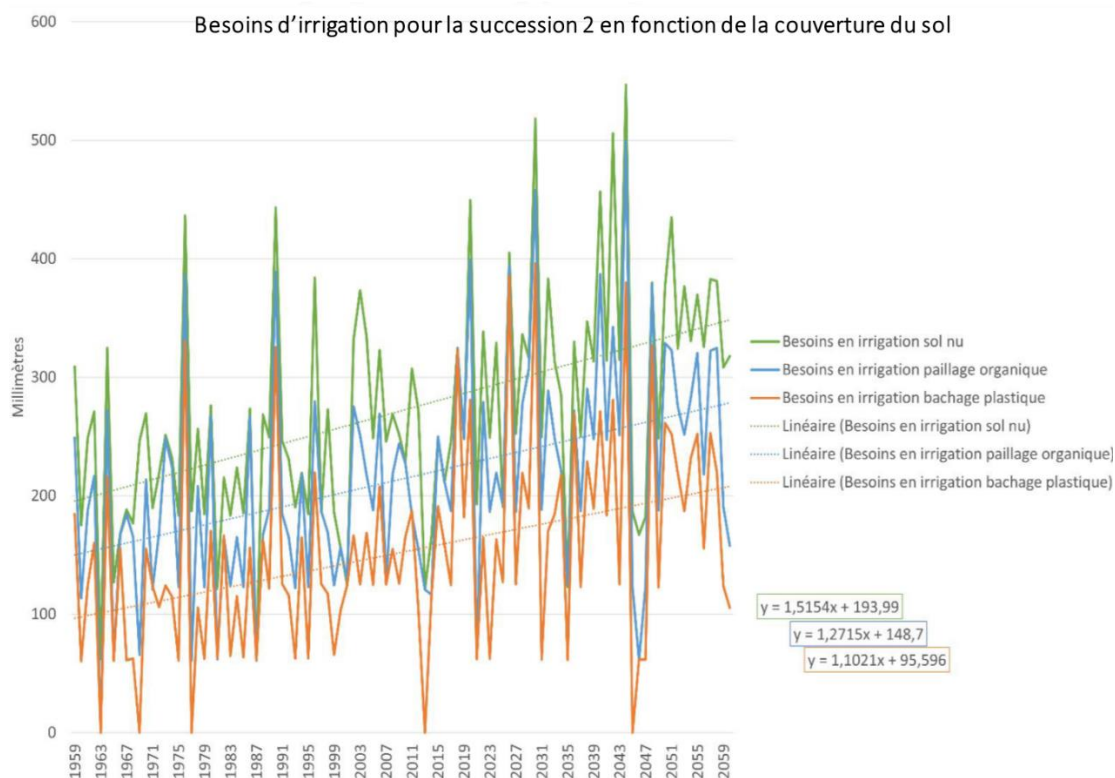


Figure 17: projections à l'horizon 2060 des besoins en irrigation de la succession type 2 sur le plateau de Saclay sur sol nu, avec paillage organique et bâchage plastique (Nguyen Vien, 2022)

Les besoins en apport d'eau s'avèrent plus faibles sur sols couverts que sur sols nus tout en restant variables en fonction des choix dans la couverture du sol (Figure 17).

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%** les besoins en irrigation en 2060 tandis que le bâchage plastique pourrait les réduire de **40%**. Si l'on considère la succession 2, l'utilisation d'une couverture recouvrant 75% de la surface du sol cultivé en plein champ pourrait réduire *a minima* de 22% les consommations en eau pour l'irrigation d'une ferme maraîchère sur le Plateau de Saclay en 2060, par rapport à la même ferme en sol nu.

Il convient de noter que ce modèle ne prend pas en compte le stress hydrique sur les cultures (réductions de l'ETM) et que les résultats obtenus demeurent associés aux choix des projections climatiques retenues.

La modélisation des bilans hydriques indique comme résultats des hausses des besoins en eau par cultures, par successions de cultures et en fonction de la couverture des sols :

- Les **cultures importantes et prédominantes** dans les systèmes maraichers et légumiers de tomate, d'aubergine, de courgette, carotte et laitue risquent d'observer, respectivement, des **hausses additionnelles** de l'ordre de +85 mm, +80 mm, +70 mm, +50 mm et de +20 mm dans les 50 prochaines années.

En parallèle avec les résultats du volet 1, les cultures exigeantes en eau (Tomate ou aubergines) sont aussi celles à forte valeur économique ajoutée pour les agriculteurs/producteurs.

- Pour les 2 successions types, les projections simulées indiquent une hausse significative des besoins en irrigation allant d'environ **200 à 300 mm en 1960** vers des besoins de l'ordre de **350-500 mm en 2060**.
- À l'échelle d'une exploitation maraîchère, il est ainsi possible de déduire que les besoins en irrigation en plein champ risquent une **hausse minimale de 17%** dans moins de **40 ans**.
- Le paillage organique permet une baisse de **22%** des besoins en irrigation par rapport à la même situation en sol nu en 2060. Les (relativement) faibles volumes d'eau aujourd'hui prélevés/consommés chez la majorité des agriculteurs enquêtés (**Volet 1, pages 9 et 10**) sont probablement en partie au moins liés à ces pratiques de couverture des sols, même si aujourd'hui des comparaisons scientifiques (à système de culture identique et contrôlé) manquent sur le territoire pour mieux diagnostiquer ces pratiques.

Vis-à-vis des résultats du **volet 1** sur les **volumes d'eau par types d'années (humides ou sèches)**, le modèle et le scénario déployé pour des projections des bilans hydriques montre une certaine cohérence avec les dires des agriculteurs. Les Figures 15 et 16 indiquent de **faibles besoins (optimaux) en irrigation** lors des années (jugées) humides 2021, 2016, 2012 et 2007 et des **besoins (optimaux) relativement élevés** lors des années (jugées) sèches de 2020, 2019 et 2003 par les agriculteurs interrogés.

Conclusion

Ce rapport fournit des données quantifiées qui mettent en évidence le caractère critique de la ressource en eau dans le futur et l'enjeu majeur que pose sa raréfaction probable, tant à l'échelle de l'exploitation qu'à celle du PAT (Projet Alimentaire Territorial) de la Plaine aux Plateaux.

Selon nos résultats, il s'agit bien d'un sujet de préoccupations pour les agriculteurs/producteurs (dont la majorité a recours aux forages) mais aussi pour les institutions locales et régionales et les scientifiques. À l'horizon 2060, nos résultats sur les besoins supplémentaires en eau d'irrigation témoignent de la criticité de la ressource (**eau nécessaire**). En parallèle, les incertitudes sur les tendances futures de l'eau souterraine (**eau disponible**) invitent à explorer d'autres pistes scientifiques pour fournir des données pertinentes sur la disponibilité de cette ressource.

Du point de vue des agriculteurs, l'aménagement de bassins de captage/récupération des eaux souterraines et pluviales émerge logiquement comme une solution stratégique et prioritaire, clés pour les autres solutions envisagées. Si la généralisation de cette solution peut susciter des débats à l'interface résilience (exploitation)-durabilité territoriale (préservation de la ressource en eau), d'autres pistes restent néanmoins intéressantes à explorer: il s'agit par exemple de la **réutilisation des eaux usées et traitées** (expérimentation en cours au niveau de la ferme de *Gally* et la station d'épuration « carré de réunion » sur la plaine de Versailles) ou d'usage des eaux de drainage, ou des bassins (tampon) contre les inondations. Ces pistes n'ont pas été évoquées directement par nos interlocuteurs en raison, probablement, des questions de localisation géographique et de taille des exploitations, mais surtout pour le caractère **collectif et territorial** qui sous-tend la mise en œuvre de ces pistes. Cette solution reflète un choix privilégié d'une **autonomie** en eau (échelle de l'exploitation) comme un facteur indispensable de production. Les autres solutions envisagées (e.g., pratiques culturelles de paillages et bâchage, automatisation des systèmes d'irrigation, décalage des calendriers cultureux) invitent à une étude des **coûts socio-économiques, organisationnels et environnementaux** adjacents à leur mise en œuvre, en fonction des systèmes de production en place. La non priorité de ces solutions dans notre échantillon indique toutefois des arbitrages (économiques Vs. écologiques) qui ne relèvent pas exclusivement de la sphère de production. À titre d'exemple, le maintien, l'introduction, l'abandon ou la substitution de certaines cultures (exigeantes en eau et à forte valeur économique) implique des interactions notables entre des choix du consommateur et de la filière d'une part, et ceux de l'agriculteur/producteur d'autre part - au niveau de la parcelle et de l'exploitation. De même pour une extension envisageable des productions sous abris (environ deux fois plus consommatrices en eau par cultures/unité de surface) pour répondre à des exigences de stabilité et de précocité de la production.

Ces résultats ouvrent **des pistes** de recherche à investir au sein des **logiques (inter-liées) agricoles et alimentaires sur le territoire francilien** : L'eau est un élément central dans la

démarche d'installation de nouveaux agriculteurs dans ces systèmes maraichers et légumiers²⁶, mais aussi dans les dynamiques de transition agro-écologique qu'on propose d'étudier dans le cadre d'une phase 2 du projet ClimaLeg-EAU. Il s'agit d'une **problématique transverse** dont les leviers et les freins doivent être anticipés aussi bien dans les démarches d'installation que celle de **diversification** en grandes cultures qui sont à l'œuvre en Île-de-France.

D'une part, cela invite à élargir les champs d'enquêtes (et d'analyses) vers des agriculteurs/producteurs déjà engagés dans des démarches de transition agro-écologiques ; ceux-ci sont particulièrement importants à l'égard de leur forte contribution à l'offre alimentaire locale, notamment celle en faveur de la **restauration collective** à l'échelle francilienne :

- Quelles trajectoires futures des exploitations agricoles, en place ou à venir, petites et grandes en voie de diversification agricole, dans un objectif de résilience²⁷ et de durabilité²⁸ des exploitations maraichères et légumières à l'échelle francilienne ?

De l'autre, il s'agit d'aller explorer, au-delà des profils de notre échantillon, les usages alternatifs économes en eau, des systèmes "types" de production (échelle exploitation) et/ou de gestion de l'eau pour l'irrigation maraichère (échelle du territoire) :

- Quelles **solutions innovantes** (existantes ou susceptibles d'émerger) sous l'influence de la raréfaction de l'eau et compte-tenu des spécificités de gestions locales de l'eau ?

Nos résultats sur le volet 2 et 3 plaident pour explorer, scientifiquement et opérationnellement, l'utilisation locale d'autres sources d'eau (dont la réutilisation des eaux usées) et ainsi jouer le rôle d'accompagnement des processus de changements des pratiques et de la gouvernance territoriale. La mise en œuvre de sources d'eau alternatives aux puisements dans l'eau souterraine de la nappe phréatique (eaux pluviales, bassins de rétention, eau recyclée, etc.) repose sur des facteurs réglementaires, de gouvernance, environnementaux, de coût et d'acceptation par les parties prenantes du territoire. L'incertitude autour des rôles et des responsabilités, ainsi que l'incertitude autour de la quantité et de la qualité de la nouvelle eau, les désaccords entre les parties affectées par sa mise en œuvre et l'ambiguïté quant à savoir qui identifiera, paiera, exploitera et/ou réglera une eau particulière.

- Les rôles des institutions locales et régionales accompagnant l'agriculture francilienne locale - dans la gouvernance territoriale de la gestion de la ressource en eau dans un objectif de **résilience des systèmes alimentaires territoriaux**. En particulier concernant les productions maraichères et légumières, **que peut-on désormais produire et où ? Avec quelles ressources en eau, gouvernées comment ?**

²⁶ Dans notre échantillon, la majorité des exploitations sont récemment installées sur de petites surfaces en lien avec les collectivités

²⁷ Résilience au sens d'un maintien au minimum des productions maraichères et légumières actuelles voire d'une hausse proportionnelle à une future demande en produits locaux

²⁸ Durabilité au sens d'une préservation de la ressource en eau en cohérence avec des impératifs agro-écologiques

Comme le récent schéma directeur de la région Ile de France l’y incite²⁹, ces pistes font l’hypothèse d’une **hausse de demande en produits locaux**³⁰ favorisant le développement des voies de diversifications et de productions maraichères, chez les producteurs nouveaux et ceux déjà en place. Dans ces perspectives, la résolution des questions concurrentes de l’offre et de la demande alimentaire de la région Île de France rencontre celle d’une adaptation à l’augmentation des besoins en eau qu’implique une production alimentaire différenciée.

Les raisonnements production/adaptation (au centre de cette phase 1 du projet) doivent s’inscrire dans des perspectives plus larges, celles de transition agro-écologique et de gestion durable de l’eau. Cela invite à s’interroger sur une **gouvernance territoriale** de l’eau de plus en plus congruente avec celle d’un système alimentaire territorialisé.

Une éventuelle **phase 2 du projet ClimaLeg-EAU** placerait les systèmes agricoles au cœur du processus de résolution des questions concurrentes de l’offre et de la demande alimentaire, ainsi que de la qualité et de la quantité de l’eau à l’horizon 2060. L’analyse des liens entre planification de l’eau et celle des systèmes alimentaires amène à la question de la gouvernance. Cette phase 2 de ClimaLeg-Eau invite à élargir la démarche territorialisée à appliquer sur d’autres espaces et d’autres échantillons d’agriculteurs franciliens, parfois situés sous des régimes différents de gestion de la ressource en eau. Des adaptations de la démarche dans une perspective de reproductibilité seront alors envisagées.

Les idées de planification "intégrée" et "conjointe" apparaissent aujourd’hui comme des éléments clés des approches émergentes de la gestion durable de l’eau et des systèmes agroalimentaires sur un même territoire. Le processus d’intégration de la gouvernance agroalimentaire et de la gestion de l’eau nous semble ainsi dépendre autant du renforcement des liens verticaux entre les nœuds décisionnels à différentes échelles spatiales et institutionnelles que de la promotion de liens horizontaux plus étroits entre acteurs ruraux et urbains.

²⁹ SRIF E schéma directeur de la région Ile de France « Objectif 2040 » a été adopté par le Conseil Regional le 12 juillet 2023. Le SDRI-E est le document d’aménagement de référence pour la Région, qui s’impose à tous les autres

³⁰ Demande qui émane de la restauration collective, des particuliers, de petite et parfois grande distribution