



HAL
open science

Comment identifier les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers et les pistes d'adaptation ? Outils opérationnels et premiers résultats appliqués aux systèmes maraîchers du sud de la France

Léa Husson, Amélie Lefèvre

► To cite this version:

Léa Husson, Amélie Lefèvre. Comment identifier les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers et les pistes d'adaptation ? Outils opérationnels et premiers résultats appliqués aux systèmes maraîchers du sud de la France. GIS PIClég; INRAE UE Maraîchage. 2023. hal-04266659

HAL Id: hal-04266659

<https://hal.inrae.fr/hal-04266659>

Submitted on 7 Nov 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Comment identifier les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers et les pistes d'adaptation ?

Outils opérationnels et premiers résultats
appliqués aux systèmes maraîchers du sud de la France

Léa Husson, chargée de mission GIS PIClég (SICA Centrex, INRAE)

Amélie Lefèvre (INRAE) amelie.Lefevre@inrae.fr

Octobre 2023

Ce rapport est accessible sur HAL INRAE : <https://hal.inrae.fr/hal-04266659>

Pour citer ce rapport : Husson, L., & Lefèvre, A. (2023). *Comment identifier les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers et les pistes d'adaptation ? Outils opérationnels et premiers résultats appliqués aux systèmes maraîchers du sud de la France*. INRAE. <https://doi.org/10.17180/QHS3-E032>

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	2
1.1 CADRAGE DE LA MISSION ET CONTEXTE	2
1.2 DEFINITION DES TERMES DU SUJET	2
1.3 DEMARCHE GENERALE DE L'ETUDE	4
2 QUEL CLIMAT DEMAIN DANS LA ZONE D'ETUDE ?	7
2.1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS	7
2.2 MATERIEL ET METHODES	7
2.3 RESULTATS	17
2.4 DISCUSSION	19
2.5 REPONSES A QUESTIONS FREQUENTES SUR LES PROJECTIONS DU CLIMAT DE DEMAIN	21
3 IMPACTS ET VULNERABILITES DES SYSTEMES MARAICHERS DU SUD DE LA FRANCE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	26
3.1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS	26
3.2 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE : QUELS PARAMETRES CLIMATIQUES IMPACTENT LA PRODUCTION MARAICHERE, QUELS IMPACTS ATTENDUS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET QUELLES PISTES D'ADAPTATION ?	27
3.3 DEMARCHE D'ATELIERS	30
3.4 REPONSES AUX QUESTIONS FREQUENTES SUR LE PERIMETRE DE LA SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET LA DEMARCHE D'ATELIER	38
4 REDUIRE LES VULNERABILITES	41
4.1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS	41
4.2 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE : QUELLES PISTES D'ADAPTATION POUR FAIRE FACE AUX IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MARAICHAGE ?	41
4.3 DEMARCHE D'ATELIER : REDUIRE LES VULNERABILITES D'UN SYSTEME CAS D'ETUDE	43
5 SUITES DE L'ETUDE ET PISTES DE TRAVAIL	47
5.1 DEMULTIPLIER LA DEMARCHE DANS D'AUTRES CONTEXTES	47
5.2 APPROFONDIR LES PISTES D'ADAPTATION	47
5.3 POURSUIVRE LA DEMARCHE DANS UNE LOGIQUE SYSTEMIQUE	47
6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49
7 AUTRES RESSOURCES	51
7.1 DEFINITIONS	51
7.2 CARTOGRAPHIE DES CANTONS MARAICHERS EN OCCITANIE ET PACA	53
8 ANNEXES	54
8.1 ANNEXE 1 - TRAME DE L'ENQUETE AUPRES DES MEMBRES DES GT DU GIS PICLEG POUR LE CHOIX DES INDICATEURS	55
8.2 ANNEXE 2 - GUIDE POUR LA PRODUCTION D'UN JEU DE DONNEES DE PROJECTION CLIMATIQUE SUR UNE MAILLE DRIAS-2020 A PARTIR D'UN SCRIPT R	56
8.3 ANNEXE 3 - EXEMPLE DE JEU DE DONNEES : AVIGNON	82
8.4 ANNEXE 4 - FICHES IMPACTS	83
8.5 ANNEXE 5 - ATELIER DU 12 JUILLET : VISUEL DES ECHANGES DE LA PHASE « DIAGNOSTIC DE VULNERABILITE »	88

1. Introduction

1.1 Cadrage de la mission et contexte

La présente étude a été financée par le GIS PIClég et menée entre le 9 janvier et le 8 septembre 2023 par Léa Husson (SICA Centrex) sous la supervision d'Amélie Lefèvre, ingénieure de recherche à l'Unité Expérimentale pour les Systèmes Maraîchers Agroécologiques d'INRAE.

Le changement climatique impacte déjà les systèmes maraîchers. En France, l'année 2022 a été marquée par un climat exceptionnellement chaud, et les événements extrêmes se sont succédés : 3 vagues de chaleur estivales, orages violents... (Météo France, 2022) Les initiatives pour faire face à ces évolutions du climat se mettent en place, mais sont locales et dispersées. Face à ces constats, le GIS PIClég a souhaité initier une étude, avec les objectifs suivants :

1. Etablir une synthèse partagée des impacts observés et attendus du changement climatique sur les systèmes maraîchers
2. Déterminer quels systèmes maraîchers sont les plus vulnérables
3. Recenser les pistes d'adaptations déjà pratiquées ou à imaginer
4. Initier une dynamique collective autour des questions de changement climatique au sein du GIS PIClég.

L'étude porte sur les systèmes maraîchers, à l'exclusion des systèmes légumiers d'industrie ou des parcelles de légumes en rotation avec des grandes cultures. Les systèmes en hors-sol sont également exclus du périmètre de l'étude. La démarche est mise en œuvre sur les systèmes maraîchers du sud de la France, mais elle doit pouvoir être transférable à d'autres territoires. Elle se focalise sur la phase de production : les effets du changement climatique identifiés sur la commercialisation et l'organisation des filières sont relevés sans constituer l'objet principal de l'étude.

Plusieurs instances ont permis de préciser les objectifs et le cadre de l'étude chemin faisant :

- Une réunion de travail le 17 février 2023 en présence de Mireille Navarrete (co-animatrice du GIS PIClég, INRAE) et Camille Billion (secrétaire générale des GIS filières agricoles, INRAE)
- Une réunion d'échanges sur des dimensions méthodologiques le 3 avril 2023 avec l'unité de service AGROCLIM d'INRAE, en présence de Marie Launay et de Carina Furusho-Percot, pour un appui spécifique sur la méthode d'utilisation des données climatiques
- Un comité de pilotage le 17 avril 2023 en présence de Mireille Navarrete, Camille Billion, Anne Sophie-Kouassi (UNILET), Margaux Kerdraon (CTIFL), Gaël Lichou (Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales), Laure Hossard (INRAE).

Les premiers résultats de l'étude ont été présentés lors du Comité Stratégique du GIS du 20 juin, et les résultats définitifs seront discutés le 3 octobre lors des Rencontres du GIS PIClég.

1.2 Définition des termes du sujet

Autour du concept de changement climatique, de nombreux termes sont employés et recourent parfois des réalités différentes selon l'interlocuteur. Afin de clarifier le vocabulaire de l'étude et de le mettre en commun avec les différents acteurs concernés, un schéma de cadrage des termes a été établi. Sauf mention contraire, les définitions retenues et présentées ci-dessous sont reformulées à partir de celles des cinquième et sixième Rapports d'Evaluation du GIEC¹, qui constitue l'instance de référence sur cette thématique.

¹ <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/> ou <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>

Le **changement climatique** s'entend comme toute variation dans l'état du climat qui peut être identifiée par des changements de ses propriétés et qui persiste à une échelle de temps long (décennies ou plus). Il peut être naturel, mais la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique le définit comme celui résultant de l'activité humaine et des émissions de gaz à effets de serre (GES).

Le GIEC a défini dans son 5^{ème} rapport différents **scénarios d'émissions de GES** (Representative Concentration Pathway 'RPC' : Profils représentatifs d'évolution de concentration) à partir d'hypothèses sur les activités à l'origine de ces émissions : un scénario optimiste où les émissions diminuent rapidement et durablement (RCP 2.6), deux scénarios intermédiaires de stabilisation des émissions avant la fin du siècle (RCP 4.5 et 6.0) et un scénario pessimiste, parfois surnommé « business as usual », où les émissions continuent d'augmenter au rythme actuel (RCP 8.5) (Figure 1). Ils sont utilisés comme données d'entrée dans les modèles climatiques pour établir des **projections climatiques**, correspondant à la réponse simulée du climat à ces scénarios d'émissions. Les **modèles climatiques** sont des représentations numériques du système climatique fondées sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus d'interaction et de rétroaction, et qui tiennent compte d'une partie de ses propriétés connues.

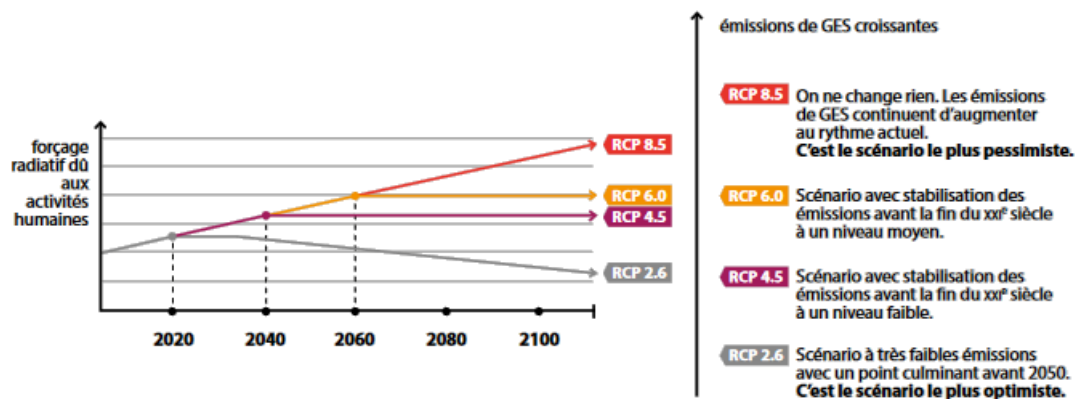


Figure 1 : Trajectoires d'évolution des émissions de GES et forçage radiatif associé (Source : Ministère de la Transition Ecologique)

Les réponses du système climatique à ces émissions impliquent la survenue d'**aléas climatiques**, qui sont des événements pouvant avoir un **impact** (effet sur les systèmes naturels ou les activités humaines), notamment sur les systèmes maraîchers pour la présente étude (Figure 2). L'**exposition** se définit ici comme l'existence de systèmes maraîchers dans des lieux, des temporalités et des contextes qui pourraient être négativement impactés. La **vulnérabilité** est une composante intrinsèque des systèmes maraîchers qui représente leur propension à être impactés négativement, en prenant en compte l'ensemble des processus et pratiques qui les composent. Les systèmes maraîchers exposés et vulnérables peuvent cependant s'adapter. L'**adaptation** est la démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu et à ses conséquences pour éviter les effets négatifs (ou exploiter de potentiels avantages). Le **risque** agrège ces éléments (exposition, vulnérabilité, adaptation) et définit le potentiel de survenue de conséquences néfastes pour les systèmes maraîchers.

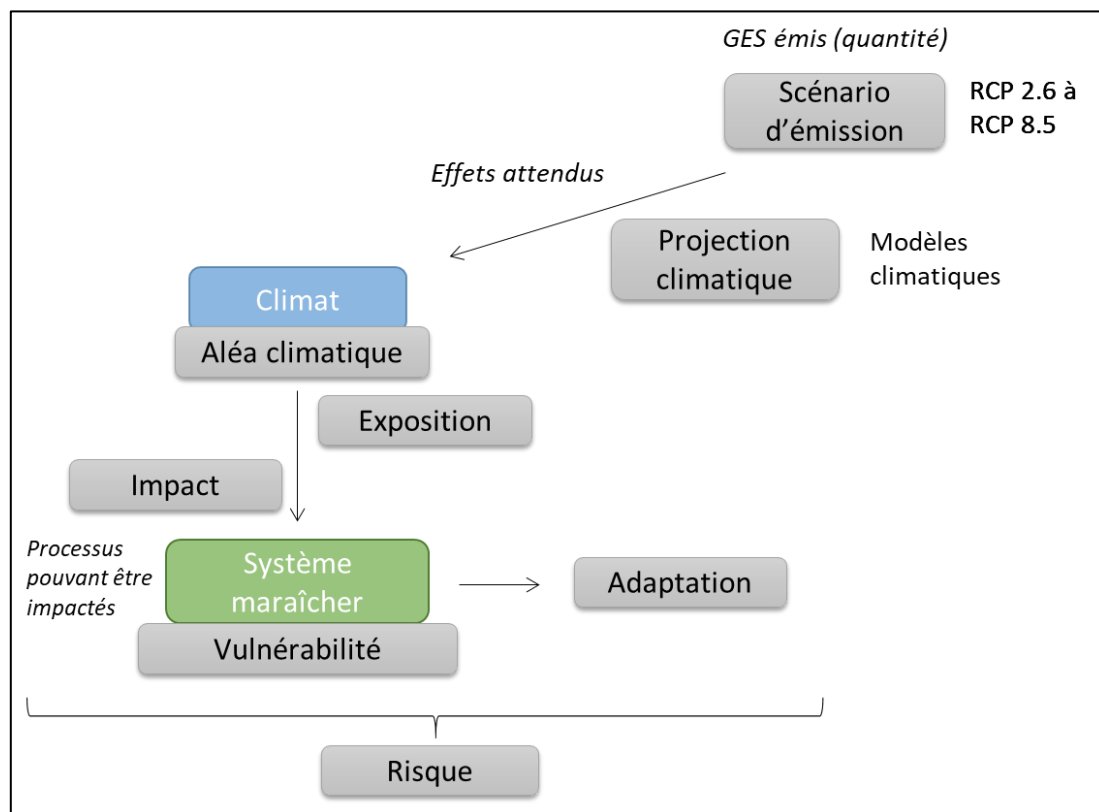


Figure 2 : Schéma de cadrage des concepts associés au changement climatique

Ces différents concepts seront repris tout au long de ce rapport, notamment pour définir les questions de travail. Ils ont été utilisés à chaque présentation et temps d'échanges au cours de l'étude pour partager une vision commune des termes autour du changement climatique.

1.3 Démarche générale de l'étude

L'objectif général de l'étude est d'**outiller les acteurs concernés par le changement climatique en maraîchage** afin de leur permettre de partager des connaissances sur le changement climatique et ses impacts sur les systèmes maraîchers, de définir la vulnérabilité des différents systèmes sur lesquels ils interviennent et d'imaginer des pistes d'adaptations au plus proche des systèmes et de l'état futur du climat.

La démarche mise en place fait la synthèse de **connaissances scientifiques** (état de l'art de la littérature scientifique et technique sur les impacts du changement climatique en maraîchage, recours aux projections climatiques localisées) et d'une **expertise collective** (via notamment un atelier multi-acteurs pour cerner les vulnérabilités et pistes d'adaptation au plus proche des systèmes). Ces dires d'experts contribuent à recueillir et synthétiser les connaissances issues d'expériences de terrain et à s'assurer de l'opérabilité des résultats produits.

A partir des objectifs initiaux de l'étude, des questions de travail ont été définies. Chacune de ces questions a fait intervenir ces deux dimensions (connaissances scientifiques et expertise collective). Le tableau ci-dessous reprend les questions de travail et les éléments correspondant à ces deux angles.

Tableau 1 : Questions traitées dans l'étude et contribution des connaissances scientifiques et expertes

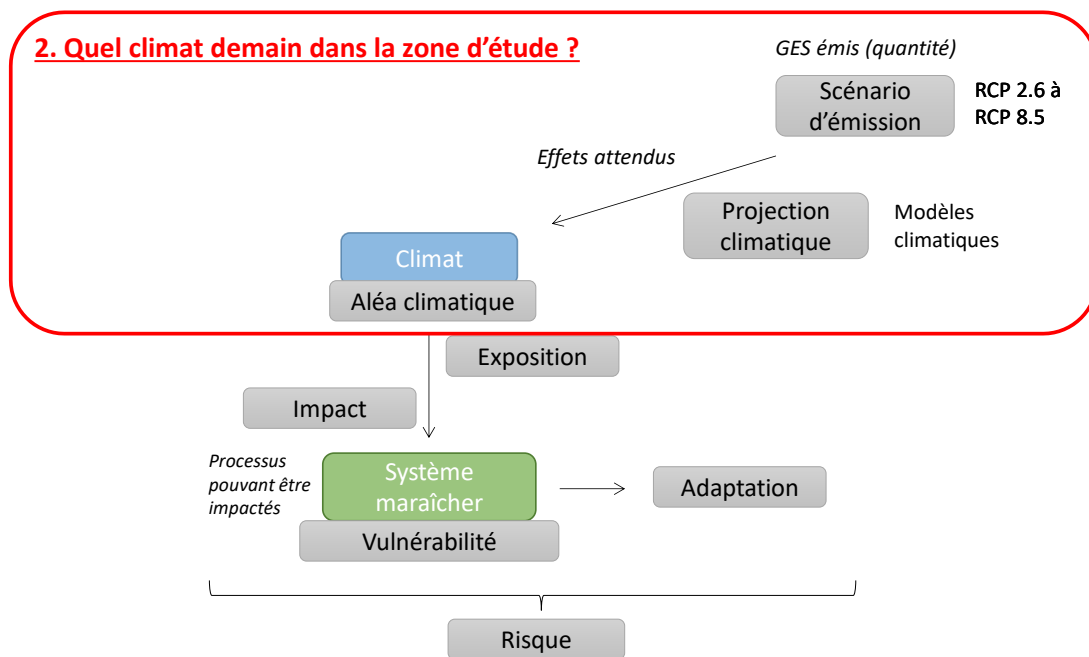
Question de travail	Connaissances scientifiques	Expertise collective
Quels paramètres climatiques impactent la production maraîchère ?	Revue de littérature sur les impacts du changement climatique en maraîchage (publications scientifiques et techniques, littérature grise, presse)	Enquête auprès des membres des groupes thématiques du GIS PIClég : lien entre climat et processus physiologiques, pratiques
Quel est l'état actuel de ces paramètres, et comment le climat va-t-il évoluer dans la zone d'étude ?	Données de projections climatiques Indicateurs (projet CLIMALEG ² , DRIAS, INRAE AgroClim, bibliographie, expertise interne)	Atelier – 6 avril, Alénia : test d'un jeu de données et construction d'indicateurs Webinaire du 29 juin : présentation de la méthode d'utilisation des données climatiques et d'un jeu de données appliqué à un territoire
Quels systèmes sont vulnérables face à cette évolution ? En quoi et comment sont-ils vulnérables ?	Revue de littérature sur les impacts du changement climatique en maraîchage (publications scientifiques et techniques, littérature grise, presse)	Atelier - 12 juillet, Avignon : diagnostic de vulnérabilité d'un système cas d'étude de Vaucluse
Quelles sont les pistes d'adaptation existantes ou à inventer pour réduire cette vulnérabilité ? Que manque-t-il pour s'adapter ?	Revue de littérature des pistes d'adaptations au changement climatique en maraîchage + recensement des projets en cours	Atelier - 12 juillet, Avignon : comment rendre moins vulnérable le système cas d'étude de Vaucluse ?

La suite de ce rapport se divisera en trois parties présentant les acquis de l'étude sur ces différentes questions de travail avant une 4^{ème} partie donnant des pistes de travail à poursuivre. **Ces acquis sont d'abord d'ordre méthodologique**, car l'étude a permis d'élaborer une démarche utilisable par différents acteurs pour répondre à ces questions dans leur territoire et pour leurs systèmes. Ces acquis sont également **d'ordre agronomique** puisque la mise à l'épreuve de cette démarche a nécessité de choisir des zones et des systèmes cas d'étude pour lesquels des résultats peuvent être produits.

La suite du rapport s'attachera à présenter ces deux types d'acquis pour les trois questions :

- Quel climat demain dans la zone d'étude ? *page 7*
- Impacts et vulnérabilités des systèmes maraîchers du Sud de la France face au changement climatique *page 26*
- Comment réduire les vulnérabilités ? *page 41*

² Voir partie 2.2.1



2 Quel climat demain dans la zone d'étude ?

2.1 Introduction et objectifs

Afin d'identifier les impacts attendus du changement climatique sur les systèmes maraîchers, il est nécessaire de **comprendre comment le climat est susceptible d'évoluer dans la zone d'étude**. Les modèles climatiques permettent d'établir des projections, et de représenter **l'évolution tendancielle du climat** selon différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Le portail 'DRIAS – Les futurs du climat' permet un accès libre aux données brutes issues de ces modèles jusqu'à 2100, pour différents scénarios. Ces données sont produites à l'échelle journalière pour plusieurs variables climatiques (températures moyennes, minimales et maximales, ETP, humidité relative ...), mais ne sont pas comparables à cette échelle. Pour utiliser et interpréter ces données, elles doivent être agrégées sur des périodes de plusieurs années, en général 30 ans afin de caractériser le climat de cette période (DRIAS, s. d.-b). Pour pouvoir les agréger, il faut donc définir d'une part **les périodes d'études**, c'est-à-dire les périodes de 30 ans que l'on souhaite comparer, mais également **les indicateurs**, c'est-à-dire les calculs à effectuer pour agréger ces données.

En plus des évolutions tendancielle, le changement climatique aura un impact **sur la fréquence de survenue des évènements ou phénomènes extrêmes et leur ampleur** (canicules, sécheresse, épisodes de grêle, gels précoces ou tardifs, fortes pluies et inondations...). Les modèles climatiques ne peuvent pas prédire leur survenue, mais il est certain que leur fréquence va augmenter dans le sud de l'Europe, surtout pour les inondations, les vagues de chaleur et la sécheresse (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023). Pour imaginer les impacts de ces évènements ou phénomènes extrêmes sur les systèmes maraîchers, il est donc nécessaire de travailler à partir d'hypothèses.

Pour aider à comprendre comment le climat est susceptible d'évoluer dans une zone d'étude, il est nécessaire

(1) de construire et mettre en forme un jeu de données de projections climatiques permettant de comparer les tendances climatiques de référence actuelles et futures pour une série d'indicateurs opérants pour les productions maraîchères,

(2) d'élaborer des hypothèses de réflexion pour les évènements climatiques extrêmes, pour lesquels les modèles climatiques n'apportent pas d'informations.

2.2 Matériel et méthodes

2.2.1 Ressources disponibles et travaux préalables

Pour imaginer le climat futur dans la zone de l'étude, plusieurs types de ressources sont mobilisables :

Les données brutes de projections climatiques DRIAS et l'application SICLIMA

Drias - les futurs du climat a pour vocation de mettre à disposition du grand public des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM). Les données DRIAS sont des données journalières de projection climatique issues de différents modèles et pour différents scénarios d'émissions. Les données brutes sont disponibles en accès libre pour une dizaine de variables (températures, précipitations, humidité, rayonnement, ETP, vent) et pour une période de 1951 à 2100³.

L'application web SICLIMA (AgroClim-INRAE ; Système d'information de données climatiques maillées) permet aux agents INRAE ou d'UMR avec INRAE d'accéder à ces données sans passer par l'interface

³ Un outil de production de cartes de projections par paramètre : <https://drias-climat.fr/decouverte>

DRIAS. SICLIMA comporte deux parties : [extraction de données](#) pour choisir un jeu de données (DRIAS ou SAFRAN) et la préparation de fichiers climatiques de données maillées (sous forme de fichiers STICS, PMP ou CSV), [calcul d'indicateurs](#) pour calculer des indicateurs agro-climatiques et éco-climatiques à partir de données maillées choisies dans la partie SICLIMA extraction de données.

En complément du site DRIAS – Les Futurs du Climat, un site consacré aux données liées à l'eau a été lancé en avril par Météo France. Il s'agit de [DRIAS – les futurs de l'eau](#). Les données sont également disponibles sous forme journalière, pour 5 variables (évapotranspiration réelle, indice SWI d'humidité des sols, équivalent en eau du manteau neigeux, drainage, ruissellement).

Les données de *Soil Wetness Index* SWI issues de DRIAS – Les Futurs de l'eau sont également utilisées pour produire le jeu de données de projection climatique. Le SWI peut s'interpréter comme le taux de remplissage de la réserve utile du sol.

[Les travaux du projet CLIMALEG](#) (2021-2022, financement : programme LEADER du plateau de Saclay de l'Union Européenne, Conseil Départemental 91 et LabEx BASC)

Le projet CLIMALEG, porté par Kevin Morel (SADAPT, INRAE) et Christine Aubry (SADAPT, AgroParisTech), vise à modéliser l'impact du changement climatique sur les productions légumières à court (horizon 2040) et moyen terme (horizon 2060) en Île-de-France et d'identifier les priorités d'adaptation. Les objectifs associés au projet rejoignent en partie les objectifs de la présente étude : identification des facteurs climatiques auxquels les productions légumières sont vulnérables, construction collaborative d'indicateurs adaptés pour que les producteurs puissent se projeter dans les scénarios climatiques futurs, modélisation de l'impact des scénarios climatiques à partir des indicateurs pour imaginer les stratégies d'adaptation possibles. (SADAPT UMR INRAE Agroparistech - CLIMALEG, s. d.)

La présente étude s'est en partie appuyée sur la méthodologie et les résultats de CLIMALEG, notamment les indicateurs choisis pour les productions maraîchères et la méthode de calcul automatisée à partir des données DRIAS (trame à compléter et script R).

[Des éléments permettant de caractériser des événements extrêmes comme les sécheresses passées](#)

Les événements extrêmes ne peuvent être modélisés, outre les tendances génériques à venir (par ex : gel tardif plus fréquent) il est possible de tracer leur fréquence de survenue pour les années récentes passées. Pour les sécheresses, des ressources tangibles permettent de suivre leur intensité, leurs dates de début et de fin et leur ampleur géographique : il s'agit des arrêtés préfectoraux de restriction des usages de l'eau pour sécheresse hydrologique. Certains départements permettent d'accéder à l'historique des arrêtés, et nous avons également pu accéder à un suivi à l'échelle du territoire national. Ces éléments ont permis de construire des hypothèses de réflexion sur les situations de sécheresse futures.

[Une synthèse bibliographique des impacts possibles du changement climatique sur les processus et pratiques liés aux systèmes maraîchers](#)

Au cours de l'étude, une synthèse bibliographique des connaissances sur les impacts attendus du changement climatique sur les systèmes maraîchers a été produite. Elle vise à cerner les **paramètres climatiques qui entrent en jeu dans la production maraîchère**, et la manière dont leur évolution peut impacter les systèmes. La méthodologie de cette synthèse et les connaissances recensées seront présentées plus en détail [en partie 3](#) (page 26). Elle a permis d'appuyer le choix de certains indicateurs utilisés dans le jeu de données de projections climatiques.

Des échanges avec l'unité de service AGROCLIM d'INRAE

Afin de consolider la méthodologie élaborée pour cette étude, des échanges ont eu lieu avec 2 ingénieures de recherche de l'unité AgroClim. L'unité se spécialise dans la gestion du réseau agroclimatique national d'INRAE, mais également dans le développement de méthodologie d'étude de l'influence du climat sur les agrosystèmes français. Les échanges ont permis d'explicitier les options méthodologiques et les risques ou incertitudes associés, de stabiliser la méthodologie, d'argumenter les choix méthodologiques à faire pour avancer dans le temps imparti et d'avoir un regard expert sur les décisions prises.

Un atelier méthodologique avec des techniciens et expérimentateurs spécialisés en maraîchage sous abri, pour tester le jeu de données climatiques

L'atelier, qui a eu lieu le 6 avril 2023 avec 13 participants (6 ingénieurs d'expérimentation/recherche et 7 techniciens), a permis de tester la compréhension d'une 1^{ère} version du jeu de données et de recueillir des retours sur la forme, la pertinence des indicateurs choisis, les indicateurs supplémentaires à intégrer. Il a aussi permis d'avoir une première approche des vulnérabilités des systèmes maraîchers découlant de l'évolution du climat traduite dans le jeu de données.

Ces différents éléments ont été utilisés pour élaborer une **méthodologie de création automatisée d'un jeu de données de projections climatiques adapté aux productions maraîchères** du Sud de la France, ainsi que des **hypothèses de réflexion sur la sécheresse comme évènement extrême**. Les points suivants détaillent les choix effectués et la manière dont ces différents éléments ont été mobilisés.

2.2.2 Jeu de données de projection climatique : quelles tendances climatiques dans la zone d'étude ?

2.2.2.1 *Source des données et emprise géographique*

Les données brutes utilisées pour la production du jeu de données correspondent aux données DRIAS-2020 extraites depuis SICLIMA, ainsi que des données de SWI extraites depuis le portail DRIAS – les futurs de l'eau. La procédure pour extraire les données depuis ces deux sources est disponible en annexe 8.2.

Les données sont disponibles à l'échelle d'un maillage de 8 km par 8 km du territoire français. Il est donc possible d'établir des projections climatiques fines à l'échelle d'une maille DRIAS. Le projet CLIMALEG a produit une méthodologie pour calculer des indicateurs climatiques à l'échelle d'une maille correspondant à leur zone d'étude. La présente étude utilise la méthodologie CLIMALEG comme point d'entrée. **Le jeu de données sera donc produit à l'échelle d'une maille DRIAS.**

2.2.2.2 *Choix des modèles*

SICLIMA propose actuellement de télécharger les données DRIAS-2020 pour trois couples de modèles GCM (modèle de climat global) /RCM (modèle de climat régional) : CNRM-CM5 / ALADIN63 ; CNRM-CM5 / RACMO22E ; EC-EARTH / RACMO22E.

Il faut donc choisir⁴ le ou les modèles qui permettront d'établir les projections sur lesquelles se basera la suite de l'étude.

⁴ Pour une procédure sans passer par SICLIMA qui importerait des données directement depuis DRIAS, puisqu'il existe 30 projections climatiques, il convient aussi de regarder la variabilité inter-modèles et de sélectionner des modèles en fonctions des questions qui sont à traiter. Cf les documents supports https://www.drias-climat.fr/document/20200914_DRIAS-ScenarioRCP4.5_support_selection_modeles_v3.pdf

Le choix le plus complet et le plus juste serait d'extraire les données de tous les modèles pour visualiser les valeurs moyennes de tous ces modèles, mais aussi pour visualiser la variabilité et les valeurs extrêmes pour un même indicateur sur la zone d'étude en fonction de ces différents modèles. Cette solution, la plus rigoureuse, est exhaustive et permet d'intégrer l'incertitude liée aux modèles de projection. Cependant, dans le temps imparti de l'étude et compte tenu de l'objectif large (zone d'étude « sud de la France » vaste, systèmes maraîchers complexes qui imposent de calculer de nombreux indicateurs), elle n'a pas été retenue.

L'autre option est de sélectionner un modèle et d'estimer par le calcul l'amplitude des valeurs pouvant être prise par un indicateur vis à vis des autres modèles. Des pistes méthodologiques pour avoir une approche multi-modèles ont été suggérées par l'équipe Agroclim, mais n'ont pas pu être mobilisées dans le temps de l'étude. Seules les **données d'un unique modèle sont utilisées dans cette étude**, ce qui constitue un biais qui réduit la robustesse des projections et impose une prudence encore plus grande sur l'interprétation des données. Pour être plus rigoureux dans la démarche de recherche de pistes d'adaptation, il conviendrait de prendre en compte 2 ou 3 modèles contrastés.

Pour choisir le modèle, on peut se baser sur un graphique disponible sur le portail DRIAS, qui positionne par saison, les différents couples de modèles GCM/RCM selon un gradient de réchauffement et de précipitations (cf Figure 3 ci-dessous). Le modèle choisi peut-être soit un modèle « moyen » par rapport à l'ensemble des modèles en saison estivale (ex : EC-EARTH / RACMO22E), soit un modèle extrême (très réchauffant ou très sec) pour interpeller sur les évolutions les plus marquées.

Nous avons choisi d'utiliser les données d'un **modèle plutôt moyen en saison d'été** développé par le Centre National de Recherches Météorologiques : **le modèle ALADIN qui fait « naturellement » peu ressortir de variations de précipitations.**

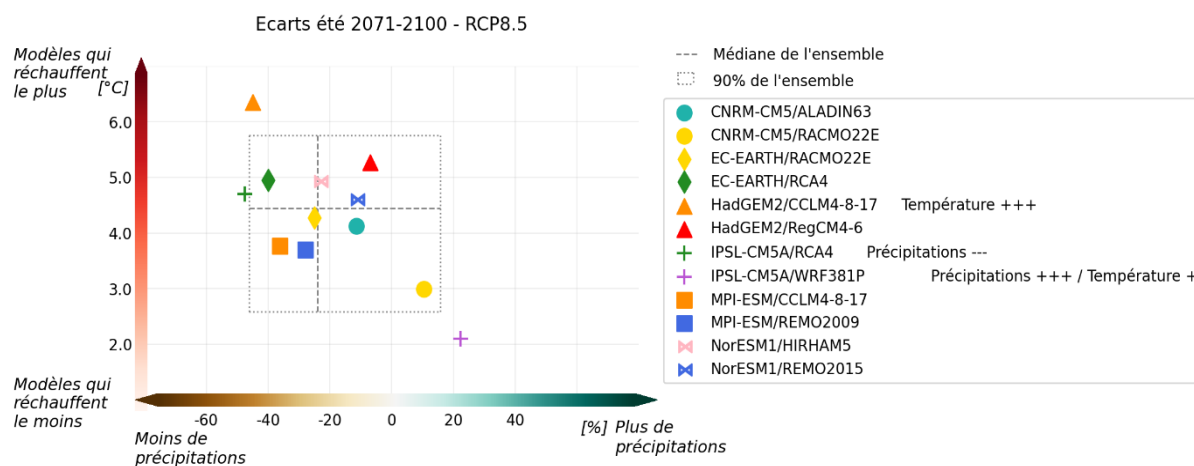


Figure 3 : Positionnement des modèles de projection climatique selon le degré de réchauffement et de précipitations prévus (en saison estivale pour l'horizon lointain et le scénario pessimiste RCP 8.5)

2.2.2.3 Choix des périodes d'étude et du scénario

Les données DRIAS sont disponibles de 1951 à 2100 pour 3 scénarios d'émissions de GES : un scénario optimiste (RCP 2.6), un scénario intermédiaire (RCP 4.5) et un scénario pessimiste (RCP 8.5).

Pour calculer des indicateurs, il est recommandé d'agréger les données brutes sur des périodes de 30 ans (DRIAS, s. d.-b). La période de référence choisie pour caractériser le climat actuel est 1991-2020, ce qui correspond aux références climatiques Météo France utilisées pour produire les normales météorologiques (*De nouvelles normales pour qualifier le climat en France | Météo-France, s. d.*). Il

faut ensuite sélectionner les 30 années futures dont on veut caractériser le climat pour le comparer à cette référence. Météo France recommande d'être prudent sur l'interprétation des données des horizons proches (2021-2030), **la période 2031-2060 a donc été sélectionnée** pour éviter ce créneau tout en choisissant un horizon temporel proche.

Pour la période étudiée (1991-2060), l'incertitude entre les différents modèles de projection disponibles est plus forte qu'entre les différents scénarios (l'écart entre les scénarios se fait plutôt après 2060, voir Figure 1). **Nous travaillerons donc sur le scénario intermédiaire RCP 4.5, sans inclure la variabilité liée aux autres scénarios.**

2.2.2.4 Choix de l'échelle temporelle de calcul

En plus des périodes sur lesquelles on calcule les indicateurs, il est également nécessaire de déterminer l'échelle temporelle des calculs : à l'année, à la saison, au mois...

Le jeu de données élaboré par le projet CLIMALEG présente les indicateurs par saison. Un jeu de données test a été élaboré pour la maille correspondant à l'Unité Expérimentale Maraîchage (Alénya), avec un découpage saisonnier. Lors du test de ce jeu de données en atelier le 6 avril, les participants ont souhaité **visualiser les indicateurs à l'échelle mensuelle**, afin de mieux cerner les points de bascule et d'analyser plus finement les impacts éventuels sur les calendriers culturels. **C'est donc l'échelle de calcul mensuelle qui a été retenue pour le jeu de données final.**

2.2.2.5 Inclure la variabilité liée à l'année

En choisissant de travailler initialement sur un seul modèle, la méthodologie ne permet pas de prendre en compte l'incertitude liée aux modèles de projection. Cependant, l'incertitude au sein du modèle est reprise dans la méthodologie, en affichant pour chaque indicateur deux valeurs : **celle d'une année « normale » et celle d'une année « extrême »**, qui correspondent à des quantiles différents. Il s'agit de la méthode utilisée dans le projet CLIMALEG qui s'est inspiré de la méthode recommandée par DRIAS pour représenter l'incertitude liée aux modèles, bien qu'elle soit ici appliquée aux données produites par un seul modèle (DRIAS, s. d.-c).

Pour chaque indicateur, le jeu de données reprend donc les valeurs suivantes (Figure 4) :

- Année « normale » : valeur de l'indicateur pour **l'année médiane de la période de 30 ans**
- Année « extrême » : **20^{ème} ou 80^{ème} centile**, valeur de l'indicateur pour la 6^{ème} ou la 24^{ème} année de la période (selon ce qu'on souhaite visualiser)

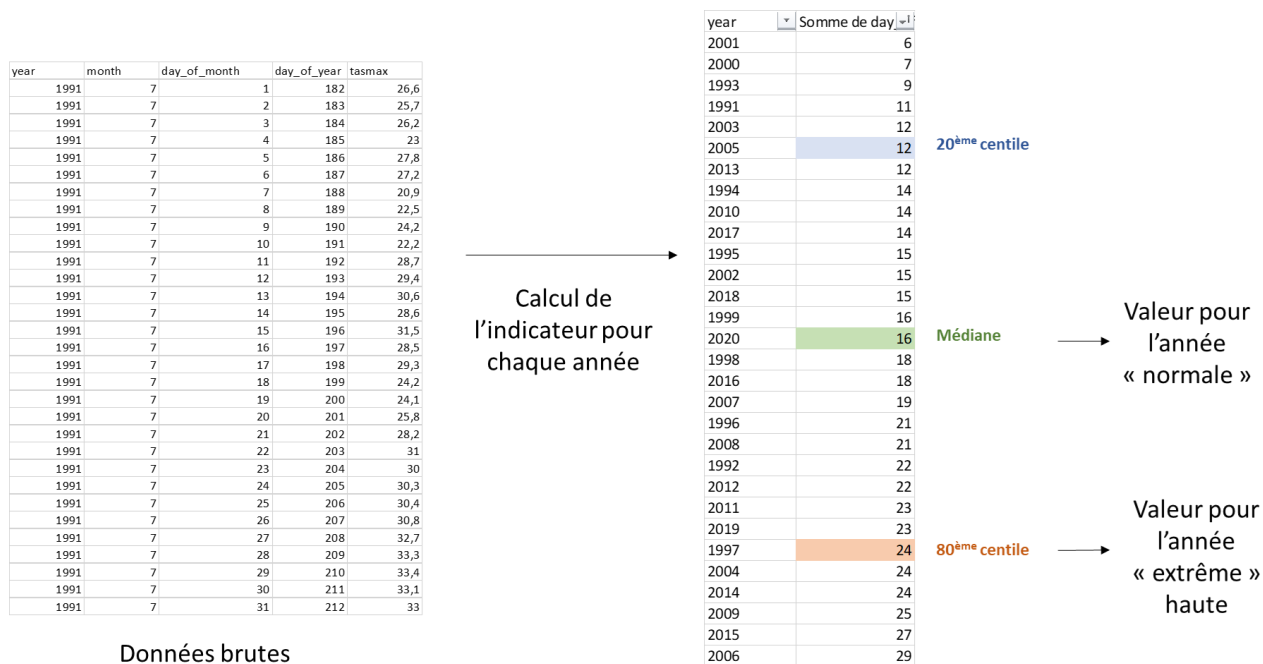


Figure 4 : Exemple de la logique de calcul pour l'indicateur "Nombre de jours où la température maximale dépasse les 30°C". Ici on choisit d'afficher l'année extrême haute, car ce sont les valeurs élevées qui vont le plus évoluer en lien avec le changement climatique.

En résumé, le jeu de données utilisé pour cette étude correspond aux données d'un seul modèle climatique CNRM-CM5 / ALADIN63, pour le scénario d'émission de GES intermédiaire RCP 4.5 sur une maille DRIAS unique (par exemple maille n°2219 où est Alénia (66) ou maille n°4812 où est Avignon (84)), pour les périodes de référence 1991-2020 et la période de projection à moyen terme 2031-2060. Les indicateurs sont calculés au grain mensuel pour une année médiane « normale » et une année extrême (« un an sur 5 ») de ces deux périodes comparées.

2.2.2.6 Choix des indicateurs

Un indicateur permet d'objectiver la perception d'un phénomène climatique, de quantifier un effet climatique, dans l'absolu (indicateur climatique) ou en lien avec des seuils correspondant à des processus ou pratiques agricoles pour imaginer les effets du climat sur une culture (indicateur agroclimatique) (Agroclim, s. d.).

Une première **liste d'indicateurs** a été définie à partir de celle du projet CLIMALEG, ayant conduit une démarche similaire sur la zone de Saclay (91). Nous avons ensuite complété cette liste, à partir

- (1) de lectures techniques et scientifiques ;
- (2) d'une enquête auprès des membres des groupes thématiques du GIS PIClég (Annexe 8.1). L'enquête a reçu 5 réponses, et les retours ont pu être partiellement exploités ;
- (3) des retours d'un panel d'expérimentateurs et techniciens experts des systèmes maraîchers sous abri lors de l'atelier méthodologique du 6 avril 2023.

La liste finale des indicateurs calculés comporte à la fois des **indicateurs généralistes**, utilisés pour définir le climat ou pour apporter des informations en lien avec des seuils agronomiques généraux, mais aussi des **indicateurs plus spécifiques aux productions maraîchères**, issues de l'expertise de l'UE Maraîchage et de la littérature scientifique et technique.

Pour les indicateurs liés au froid, les données journalières issues des modèles ne nous permettent pas d'accéder de manière immédiate à un **nombre d'heures de froid** (par exemple inférieures à 7°C, seuil pour la fraise). Cependant, des reconstitutions sont possibles à partir d'approches sinusoïdales basées sur les températures moyennes. La méthode utilisée dans cette étude est disponible en annexe 8.2.

La liste ci-dessous reprend les différents indicateurs calculés dans le jeu de données :

	Indicateurs généralistes	Indicateurs spécifiques aux productions maraîchères
Température de l'air	Températures moyennes, minimale et maximale atteinte	Nombre de jours avec humidité relative > 80%
	Nombre de jours à + de 30°C et + de 35°C (+ dates de premier et dernier jour dans l'année)	Date du premier jour avec risque de vol de pucerons (tmin>12°C)
	Amplitude jour/nuit	Nombre de jours chauds d'hiver (tmax>20°C)
	Nombre de jours avec risque de gel à 0°C et à -2°C (+ dates de premier et dernier jour)	Nombre d'heures de froid (températures horaires estimées à partir de tmin et tmax)
Précipitations Humidité relative	Nombre de jours de pluie (>1mm)	
	Cumul de précipitations (et max en 3 jours)	
	Cumul ETP + déficit hydrique climatique (Précipitations – ETP)	
	Humidité moyenne de la journée	
Humidité des sols	Indice d'humidité des sols (SWI \approx taux de remplissage de la RU)	
	Nombre de jours où le sol est sec (SWI < 0,4)	

Certains indicateurs jugés nécessaires pour imaginer les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers n'ont pas pu être inclus car les données DRIAS-2020 ne comportent pas de variables permettant de les calculer. Il s'agit notamment des indicateurs liés à la direction du vent et à la vitesse des rafales (la seule variable DRIAS disponible est la vitesse moyenne journalière du vent), et à la température du sol (les variables DRIAS de température concernent la température de l'air). Des indicateurs liés au rayonnement ont été jugés nécessaires pour estimer les risques de brûlures et les conditions climatiques de la journée. Les données brutes issues du modèle utilisé permettent de les calculer, mais il existe une incertitude sur les données de rayonnement issues de certains modèles (DRIAS, s. d.-a). Ces indicateurs jugés peu fiables n'ont donc pas été repris dans le jeu de données. L'ensoleillement d'une journée peut être approximé grâce à l'amplitude thermique (Tmax-Tmin) : une faible amplitude caractérise les jours couverts et/ou venteux.

Peu d'indicateurs liés à l'évolution des cycles de bioagresseurs ont été repris dans le jeu de données. En effet, chaque bioagresseur a des traits d'histoire de vie spécifiques induisant autant de seuils de réponse aux paramètres climatiques. En outre, ces seuils ne sont pas tous connus. Dans le temps de l'étude, il n'a pas été possible de traiter cette question. Une piste pour améliorer la méthode serait d'accéder aux seuils utilisés dans les outils d'aide à la décision existants ou dans les réseaux d'épidémiologie-surveillance.

2.2.2.7 Mise en forme du jeu de données

Le jeu de données de projections climatiques compte environ 25 indicateurs calculés à chaque fois :

- Pour l'année normale et l'année extrême (2 lignes par indicateurs)
- Pour chaque mois et pour les deux périodes d'étude (1991-2020 et 2031-2060).

Au final, chaque indicateur occupe donc 2 lignes et 24 colonnes dans le tableau.

Pour rendre plus lisible le jeu de données final, les participants à l'atelier méthodologique du 6 avril ont suggéré de mettre en place un **gradient de couleur** permettant de **visualiser l'écart entre la projection et la référence**. Les cases des colonnes 2031-2060 du jeu de données final sont donc **colorées en fonction du pourcentage de différence** avec la valeur 1991-2020 et du sens de variation (rouge si augmentation par rapport à la référence, bleu si diminution) (Figure 5).

Cette mise en forme à elle-seule peut guider la lecture, mais il est nécessaire de préciser ces limites lors de l'utilisation du jeu de données comme support de réflexion. En effet, l'application - à toutes les cases du tableau - des mêmes classes de pourcentage présente des limites. L'augmentation d'un indicateur dont la valeur initiale est basse (ex : températures des mois d'hiver) sera par exemple mise en évidence plus facilement du fait des classes uniformes par pourcentage, que l'augmentation d'un indicateur dont la valeur initiale est élevée (ex : températures des mois d'été), et ce même si la valeur absolue de la différence est la même.

La Figure 5 présente la manière de lire le jeu de données de projections climatiques (voir un exemple de jeu de données en annexe 8.3).

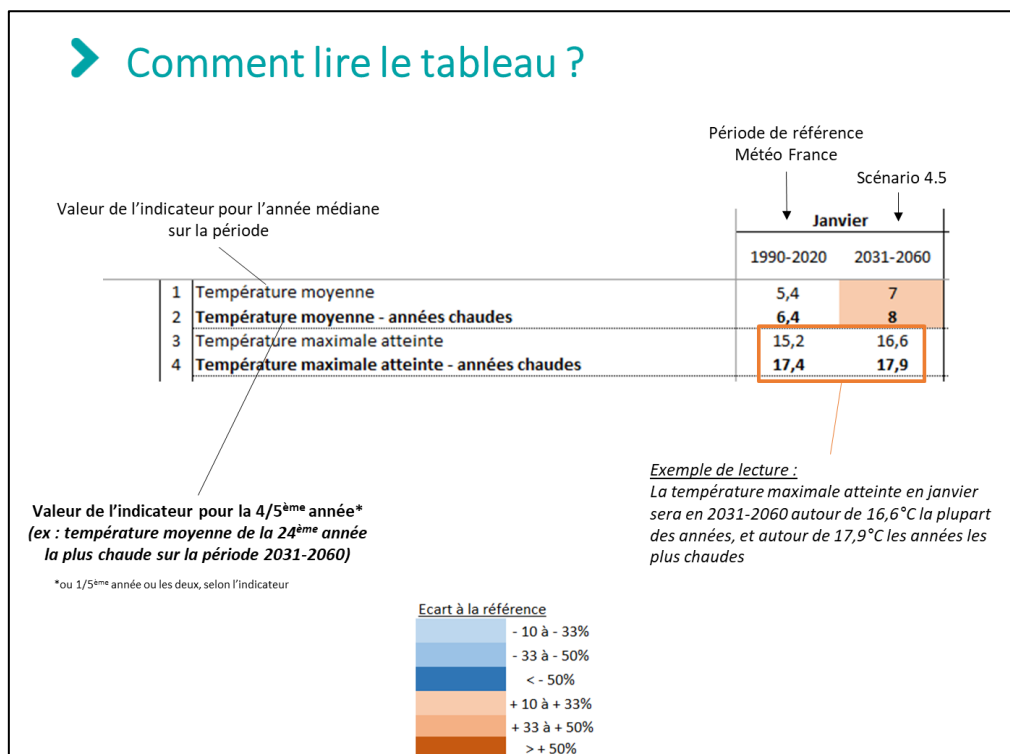


Figure 5 : Guide de lecture du jeu de données de projections climatiques

2.2.3 Hypothèses de réflexion : comment vont évoluer les événements extrêmes dans la zone d'étude ?

La fréquence des événements extrêmes va augmenter, mais on ne peut pas modéliser leur survenue de manière fiable. Il n'est donc pas possible d'intégrer ces événements au jeu de données de projections climatiques. Cependant, en observant la fréquence de ces événements au cours des dernières années et compte tenu des informations notamment synthétisées par le GIEC, il est possible **d'établir des hypothèses de réflexion qui, si elles n'ont pas de valeur prédictive, permettent d'envisager différents cas de figure.**

La production maraîchère consomme de l'eau, en grande partie apportée par l'irrigation dans le sud de la France où les mois estivaux sont peu pluvieux. Les systèmes maraîchers sous abris sont en outre par définition dépendants des apports d'eau par irrigation. Il est donc capital de réfléchir à la question de l'accès à l'eau pour imaginer l'avenir de la production maraîchère. Or les modèles climatiques ne peuvent pas prévoir les événements d'extrêmes sécheresses qui résultent de plusieurs paramètres combinés, qui sont de plus en plus fréquentes et impactent déjà les exploitations, parfois pendant plusieurs mois consécutifs.

Face à ce constat, **l'étude se focalise sur la sécheresse** à l'exclusion des autres événements extrêmes plus ponctuels (inondation, gel...). On considère une sécheresse comme un déficit hydrique d'au moins une composante du cycle hydrologique :

- Sécheresse météorologique : déficit de précipitations
- Sécheresse agricole ou édaphique : déficit d'humidité moyenne des sols
- Sécheresse hydrologique : liée au débit des cours d'eau ou au niveau des nappes (Soubeyroux et al., 2012).

Pour formuler une hypothèse vis-à-vis de la sécheresse, on se place dans le contexte d'un producteur qui irrigue à partir d'un forage ou de prélèvements dans un cours d'eau, qui correspond à la situation de nombreux producteurs du Sud de la France. Dans ce contexte de sécheresse hydrologique, il peut être soumis à **différents niveaux de restriction en cas de tension forte sur la ressource en eau**. Des mesures minimales sont prévues à l'échelle nationale pour ces différents niveaux de restriction. Cependant, les préfets des départements concernés par la sécheresse peuvent adapter ces mesures à la situation particulière d'un territoire. Nous pouvons donc retenir 2 niveaux de restriction possibles : un niveau « alerte renforcée » et un niveau « crise » correspondant aux mesures préconisées au niveau national (Ministère de la Transition Ecologique, 2023) :

- **Alerte renforcée** : Réduction des prélèvements à des fins agricoles supérieure ou égale à 50% (ou interdiction supérieure ou égale à 3,5 jours par semaine)
- **Crise** : Arrêt des prélèvements non prioritaires y compris des prélèvements à des fins agricoles

NB : les mesures retenues ici correspondent à celles prévues par l'arrêté cadre national, mais chaque préfet peut faire évoluer ces mesures pour correspondre à la situation de son territoire. A titre d'exemple, les Pyrénées-Orientales en septembre 2023 sont en situation de crise sécheresse depuis mai 2023, dans des secteurs dont certains étaient déjà en alerte renforcée depuis juillet 2022. Les prélèvements agricoles restent cependant autorisés avec des réductions de 80% des prélèvements pour l'irrigation gravitaire, de 50% pour l'irrigation localisée et de 40% sous abri (Arrêté préfectoral n° DDTM/SER/2023/206-004 du 25 Juillet 2023, 2023).

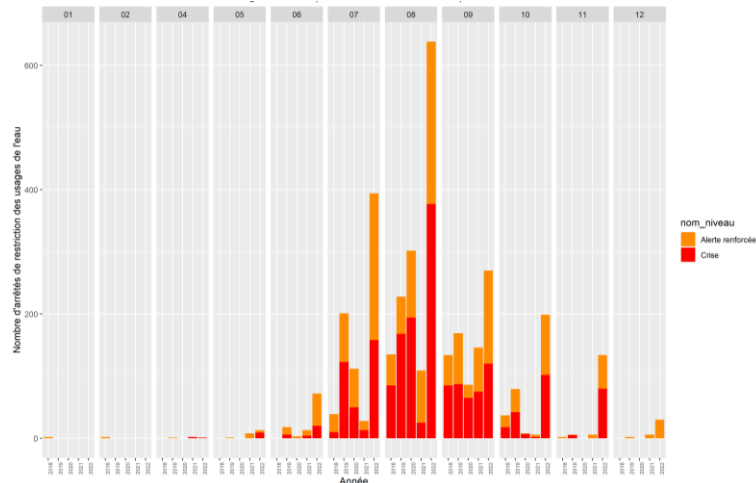


Figure 6 : Evolution du nombre d'arrêtés de restriction des usages de l'eau selon le mois depuis 2017, pour les 19 départements des régions PACA et Occitanie (Source des données : Données Sécheresse - Propluvia - data.gouv.fr, s. d.)

Pour construire des hypothèses de réflexion sur la sécheresse, il faut également imaginer différentes périodes d'application de ces mesures. Les données historiques des arrêtés sécheresse sont accessibles en ligne (*Donnée Sécheresse - Propluvia - data.gouv.fr, s. d.*) et permettent de tracer l'évolution mensuelle du nombre d'arrêtés et de leur niveau (Figure 6).

A partir de ces éléments, on peut imaginer 3 situations avec un gradient d'intensité de la sécheresse :

- **Scénario 1 : été sec (situation normale)**

—> Alerte renforcée sur juillet – août – septembre, correspond à une situation observée dans 25 à 70 départements français chaque été depuis 2002 (EauFrance, s. d.)



- **Scénario 2 : sécheresse estivale précoce (assez fréquent)**

—> Alerte renforcée depuis avril et crise en fin d'été (août/septembre), qui correspond à une situation classique depuis 2012 avec des arrêtés sécheresse de niveau « crise » apparaissant en fin d'été (août/septembre) et des sécheresses précoces pouvant intervenir, notamment au printemps



- **Scénario 3 : sécheresse prolongée (exemple des Pyrénées-Orientales en 2022-2023) (peu fréquent)**

—> « Été sec » (scénario 1) ou « Sécheresse estivale précoce (scénario 2) suivi d'un hiver sec où les restrictions ne peuvent pas être levées, puis à nouveau un été sec où le passage en crise est nécessaire dès l'amorce de la saison



Ces différentes hypothèses de réflexion ont été utilisées lors des échanges en atelier en complément du jeu de données présenté en 2.2.2. Ces hypothèses illustrées ont servi à sensibiliser à la question de l'accès à l'eau pour l'irrigation, d'une importance capitale en maraîchage.

2.3 Résultats

2.3.1 Production d'une méthode transférable à d'autres zones géographiques

La méthodologie élaborée (Figure 7) permet, pour une zone géographique correspondant à une maille DRIAS, de produire les outils et supports (indicateurs, tableau) permettant de s'approprier les tendances climatiques pour la période 2031-2060 et de les comparer à celles de 1991-2020. Elle permet également d'amorcer une réflexion sur la disponibilité de l'eau dans un bassin de production et un périmètre d'irrigation et d'anticiper les conséquences des périodes de sécheresse.

Les documents et outils associés à la méthode⁵ (script R, guide d'utilisation du script R et tutoriels pour l'extraction des données source issues de modèles climatiques) permettent à un novice de reproduire la démarche sur une autre maille DRIAS-2020 et de produire un nouveau jeu de données de projections climatiques (en utilisant les outils R et Excel). Tout est accessible sur <https://doi.org/10.57745/IQMZDE>

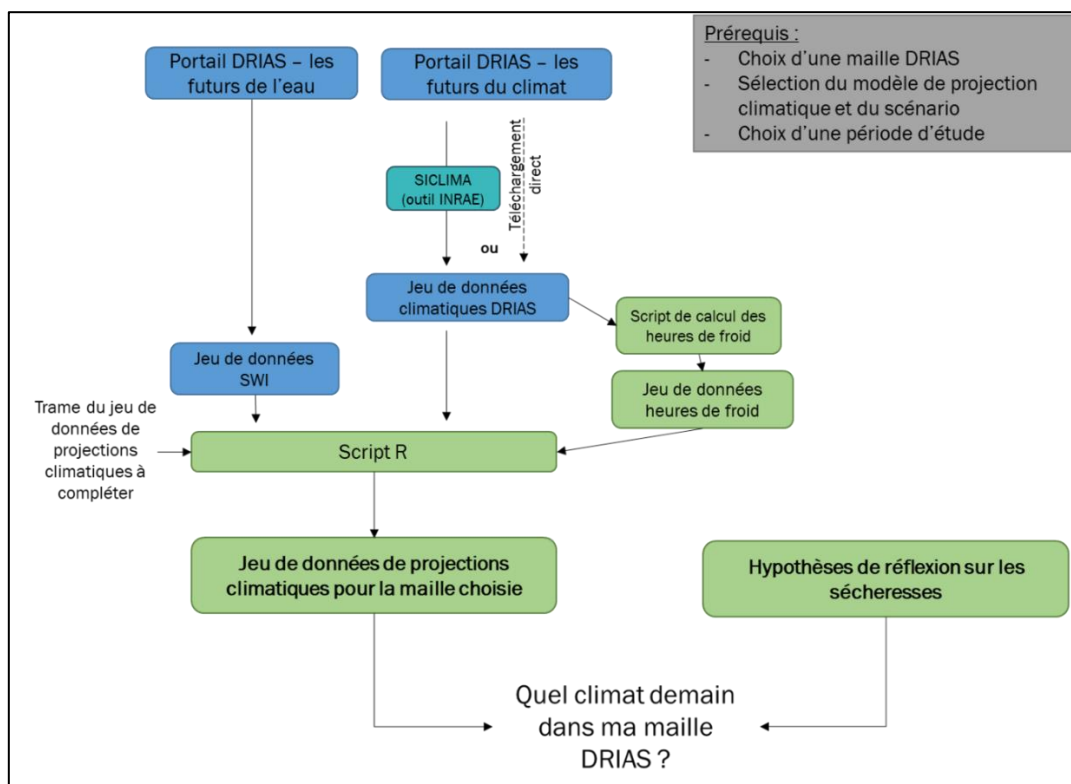


Figure 7 : Schéma récapitulatif des outils et supports pour imaginer le climat futur dans une zone géographique correspondant à une maille DRIAS

Les indicateurs retenus et formalisés dans le **jeu de données** permettent de mettre en relation l'évolution du climat avec des processus et pratiques spécifiques du maraîchage.



Ces indicateurs ont pu être testés auprès d'un public expert à plusieurs occasions : d'abord dans un atelier méthodologique à l'UE Maraîchage avec des techniciens et ingénieurs en expérimentation sous abri, puis dans un webinaire et un atelier de réflexion sur les vulnérabilités des systèmes maraîchers face au changement climatique, avec des conseillers, expérimentateurs et chercheurs avec une expertise généraliste des productions maraîchères.

⁵ HUSSON, Léa; LEFEVRE, Amélie, 2023, "Scripts R pour générer un jeu de données comparant les tendances climatiques de références actuelles aux projections futures pour une série d'indicateurs climatiques opérants en production maraîchère", <https://doi.org/10.57745/IQMZDE>, Recherche Data Gouv

2.3.2 Un cas d'étude : Climat futur à Avignon

Afin de produire la méthodologie précédemment évoquée, une maille DRIAS a été sélectionnée pour tester la production du jeu de données et pour évoquer les hypothèses de réflexion sur la sécheresse. Il s'agit de la maille 4812, correspondant à une zone de 8 km par 8 km autour d'Avignon/Châteaurenard (Figure 8). Pour cette zone, l'étude a donc permis d'élaborer des projections climatiques. Ce jeu de données est disponible en annexe 8.3. La projection ainsi que les hypothèses de réflexion sur la sécheresse modélisent une évolution de plusieurs paramètres climatiques pour la zone d'Avignon.

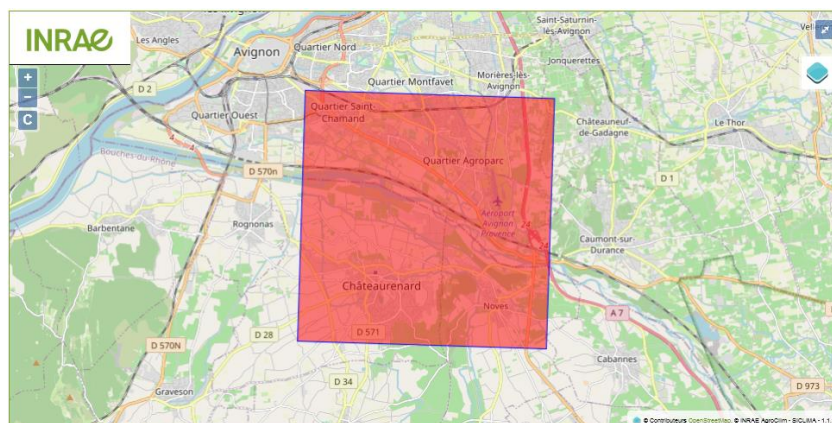


Figure 8 : Emprise géographique de la maille DRIAS n° 4812 (Source : SICLIMA)

Au niveau des températures, la température moyenne et les maximales relevées devraient augmenter, surtout en hiver (novembre, décembre, janvier) et en début d'été (mai, juillet). Les jours à plus de 30°C devraient également être plus nombreux, surtout en juin et en septembre, et la période où peuvent survenir ces jours chauds s'allonge d'une semaine. Les jours à plus de 35°C devraient suivre la même évolution, et parfois intervenir dès juin. Un mois de juillet chaud pour la période actuelle correspondrait à un mois de juillet normal en 2031-2060. Les étés devraient donc être plus longs et plus chauds. Ces évolutions sont d'autant plus marquantes qu'elles ne traduisent que les tendances, et ne prennent pas en compte les éventuelles canicules.

Les températures minimales relevées devraient augmenter toute l'année, et surtout hors de l'été. Le risque de gel devrait diminuer, avec moins de jours à risque et une période de risque plus courte d'au moins une vingtaine de jours. De plus, la zone d'Avignon compterait 400 heures de froid en moins entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} avril (passage de 1800 à 1400 heures).

Concernant les précipitations, la seule tendance qui semble se dessiner clairement est une baisse de précipitations en septembre et octobre. L'ETP devrait également augmenter, surtout sur les mois d'été, ce qui accentuerait la demande en eau d'irrigation. En parallèle, en se basant sur les données historiques de restrictions et les hypothèses formulées, les sécheresses hydrologiques devraient également être plus nombreuses, avec un été en restriction la plupart des années, et parfois des sécheresses qui débutent au printemps et/ou se poursuivent sur plusieurs années.

En ce qui concerne la sécheresse des sols, les années sèches devraient être plus sèches sur tous les mois de l'année (diminution du SWI et donc de la réserve utile des sols). En année normale, les sols seraient plus secs en automne et en début d'hiver, sans doute du fait des précipitations moins importantes. En début d'été, on remarque que les sols seraient également plus secs : cela appuie l'hypothèse que l'été commencerait plus tôt.

2.4 Discussion

2.4.1 Incertitudes sur les projections et limites de la méthode proposée

Les projections établies par les modèles climatiques présentent des incertitudes, à plusieurs niveaux :

- Incertitudes socio-économiques liées à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre, et donc aux différents scénarios d'émissions (**incertitude liée aux émissions**) ;
- Incertitudes scientifiques et techniques liées à l'approximation faite par les modèles des phénomènes réels et à une compréhension imparfaite de la réalité de ces phénomènes (**incertitude liée aux modèles**) ;
- Incertitude liée à la variabilité naturelle du climat ;
- Incertitude liée à la descente d'échelle (passage d'un modèle de climat global à des modèles régionaux).

Ces cascades d'incertitude sont inhérentes à la modélisation et ne peuvent être contournées (DRIAS, s. d.-c). **Les données de projection climatique n'ont donc pas une valeur prédictive** : elles représentent simplement une **évolution plausible du climat** compte tenu des connaissances actuelles (DRIAS, s. d.-b).

Pour tenir compte de ces incertitudes, il est recommandé d'étudier la dispersion des valeurs issues des projections en intégrant l'incertitude liée aux scénarios d'émissions et aux modèles, ou au moins une des deux. Dans le cas de la présente étude, l'incertitude liée aux scénarios d'émissions n'a pas été étudiée, car elle est assez faible sur l'horizon temporel sélectionné (2031-2060).

La robustesse de la méthode utilisée est limitée par l'utilisation d'un seul modèle climatique. En effet, l'incertitude liée aux modèles n'est pas prise en compte dans l'état actuel de la méthode. La dispersion des valeurs, retranscrite par l'affichage de la médiane et de quantiles, ne traduit donc **que l'incertitude inhérente au seul modèle ALADIN**. Pour une utilisation plus juste de ces données, il faudrait donc intégrer l'incertitude liée aux modèles, en recalculant les indicateurs et leur dispersion à partir des données issues de plusieurs modèles, ou en estimant par le calcul l'écart possible entre les différents modèles. Pour ce dernier point, des méthodes permettent d'estimer le biais lié aux modèles pour des indicateurs basés sur des seuils (ex : nombre de jours à plus de 30°C, Hoffmann et al., 2018), ou plus généralement d'évaluer l'incertitude liée aux modèles dans le calcul d'indicateurs à l'échelle européenne (Lung et al., 2013). Il serait pertinent d'approfondir ces méthodes multi-modèles pour produire des supports de prédiction plus robustes et permettant aux acteurs de se saisir de ces projections climatiques dans leur diversité.

D'un point de vue géographique, il conviendrait en complément d'affiner le choix des modèles selon la zone d'étude (sud de la France). En effet, la position des modèles selon le degré de réchauffement et de précipitations prévus (voir Figure 3) peut évoluer selon la zone géographique concernée.

Par ailleurs, en terme spatial, utiliser un jeu de données issue d'une seule maille de 8kmx8km peut également apporter un biais lié à la localité et l'effet maille.

En ce qui concerne les calculs d'indicateurs, les valeurs médianes sont affichées dans le jeu de données, ainsi que certains quantiles : 1^{ère} ou 4^{ème} valeur sur 5, selon l'indicateur. Pour certains indicateurs, notamment ceux liés aux précipitations, à l'ETP et à l'humidité des sols, les valeurs pour les années sèches et humides ont été reprises dans le jeu de données. En revanche, pour les indicateurs liés à la température, seules les valeurs hautes ont été indiquées en plus de la médiane, en partant du postulat que ce sont ces valeurs qui changeraient le plus avec le changement climatique. Cependant, pour plus de rigueur, il serait pertinent d'intégrer les valeurs hautes et basses pour tous les indicateurs. Enfin, si

l'amplitude thermique peut constituer un proxy pour le rayonnement global, il faudrait ajouter à l'amplitude maximale (proxy d'un rayonnement élevé), l'amplitude thermique minimale pour représenter des jours au ciel couvert.

Enfin, les hypothèses de réflexion sur la sécheresse et l'accès à l'eau pour l'irrigation des cultures ont été élaborées à partir de données historiques du nombre d'arrêtés de restriction pris sur les régions Occitanie et PACA. Si cette méthode permet de visualiser rapidement les mois les plus concernés par les arrêtés et les niveaux de restriction, il serait intéressant de compléter l'analyse en étudiant la part de la surface concernée par les arrêtés de chaque département, et la durée des sécheresses pour chaque zone géographique. En effet, les arrêtés sont parfois pris à des grains très fins, et le seul nombre d'arrêtés ne permet pas de traduire l'ampleur géographique des sécheresses ni leur intensité. De plus, la méthode utilisée ne permet pas de montrer l'enchaînement des situations de restriction, et de déterminer si deux arrêtés similaires en termes de niveau de restriction et de mois de déclenchement entraînent les mêmes conséquences dans les mois suivants.

De plus, une des limites à ces hypothèses départementales mais aussi de l'analyse de projection pour une maille donnée, tient aux connexions et dépendance entre un territoire de production maraîchères et les territoires en amont sur le plan hydraulique, qui pourvoit aux ressources pour l'irrigation. C'est le cas dans les Pyrénées-Orientales mais aussi en Avignon dont la capacité d'irrigation dépend de l'alimentation du bassin de Serre-Ponçon dans les Alpes.

2.4.2 Portée des indicateurs et information apportée

Les indicateurs présentés dans le jeu de données de projections climatiques ont été initialement repris de la liste établie par le projet CLIMALEG. Ils sont issus des retours de 25 maraîchers d'Île-de-France, en agriculture conventionnelle ou biologique et avec des productions diversifiées vendues principalement en circuit court. La répartition des surfaces entre abri et plein champ n'y est pas précisée. Pour la présente étude, nous avons mis en discussion les indicateurs avec un collectif de techniciens et ingénieurs spécialisés en **maraîchage sous abri**. Si les indicateurs supplémentaires intégrés au jeu de données suite à ces retours présentent un intérêt pour les productions sous abri, il est difficile d'affirmer qu'un collectif spécialisé dans les productions de plein champ aurait eu les mêmes suggestions. Ce jeu de données a également été mobilisé dans des ateliers d'échanges sur la vulnérabilité des systèmes maraîchers, avec cette fois un collectif à l'expertise plus généraliste, mais **en choisissant pour cas d'étude un système sous abri** (voir partie 3). Il est donc nécessaire de mettre à l'épreuve ce jeu de données par des temps d'échanges **sur les productions de plein champ**, afin de s'assurer de son opérabilité pour une diversité de situations de production maraîchère.

Le jeu de données présenté comporte **des lacunes, notamment pour imaginer l'évolution des bioagresseurs**. Cette dimension a été mise de côté en raison de sa complexité de mise en œuvre (peu de seuils facilement accessibles et large gamme de bioagresseurs) et du calendrier de l'étude. Cependant, il s'agit d'un élément essentiel à considérer pour le futur de la production maraîchère face au changement climatique. Pour rendre le jeu de données plus opérant, il faudrait **intégrer plus d'indicateurs sur cette dimension de risque sanitaire**, en s'assurant que les seuils utilisés correspondent aux traits d'histoire de vie des bioagresseurs ou des auxiliaires, ou à des pratiques culturelles de lutte contre les bioagresseurs (par exemple gène de résistance thermosensible).

Enfin, au cours de l'étude, la mobilisation d'experts pour avancer a parfois été compliquée. Pour le choix des indicateurs, une enquête diffusée auprès d'une soixantaine de membres du GIS PIClég n'a recueilli que 5 réponses, et le calendrier serré a également diminué le nombre de participants potentiels aux ateliers (et la répétition initialement prévue des ateliers multi-acteurs). Pour affiner la

méthodologie et s'assurer qu'elle soit opérante pour les acteurs de la filière maraîchage, il faudrait pouvoir fédérer une expertise plus large et pluridisciplinaire. Cela permettrait d'affiner les seuils auxquels répondent les processus physiologiques des cultures et les pratiques culturales en maraîchage.

2.5 Réponses à questions fréquentes sur les projections du climat de demain

2.5.1 Pourquoi ne pas utiliser les outils de calcul d'indicateurs existants ?

Différents outils et applications permettent d'agrèger les données de projections climatiques en indicateurs afin d'évaluer les impacts du changement climatique.

SICLIMA Calcul, développé par l'unité de service Agroclim à destination des agents INRAE, permet de calculer des indicateurs agro- ou éco-climatiques⁶ à partir de projections climatiques maillées (voir 2.2.1). Le processus de calcul impose le choix d'une espèce pour le calcul des indicateurs agro-climatiques, voire même d'une variété pour les indicateurs éco-climatiques. Le choix de l'espèce modifie les seuils de réponses pris en compte dans le calcul des indicateurs, et le choix de la variété peut même permettre d'affiner les seuils de réponses selon les sensibilités variétales. En septembre 2023, 5 espèces sont disponibles : blé, blé dur, maïs, pomme de terre et vigne. L'utilisation de SICLIMA Calcul impose donc de choisir une espèce-modèle pour le choix des indicateurs. Il est possible d'utiliser une espèce « anonyme » à paramétrer pour les seuils et stades phénologiques. Cette approche n'a pas été jugée pertinente dans le temps imparti pour évaluer les impacts du changement climatique non pas sur une culture maraîchère en particulier, mais sur les systèmes maraîchers caractérisés par la diversité des espèces produites et des modes de production.

L'utilisation d'un autre outil INRAE, GETARI, permet de créer un fichier d'indicateurs en choisissant en amont les phases phénologiques pour lesquels calculer les indicateurs, ainsi que de paramétrer les seuils de réponse. Le fichier GETARI en sortie ainsi obtenu peut être utilisé dans SICLIMA Calcul pour intégrer des espèces non-disponibles dans l'outil. Les échanges avec l'équipe d'Agroclim ont permis d'explorer cette piste pour intégrer à SICLIMA Calcul des seuils propres aux cultures maraîchères. Dans le temps imparti, cette option n'a pas été retenue en raison de la complexité de la méthode par comparaison avec l'utilisation d'un script R. De plus, GETARI est accessible hors INRAE mais pas SICLIMA Calcul qui est un outil INRAE donc pas accessible à tous les destinataires de la présente étude.

Cela dit, ces outils GETARI et SICLIMA permettent d'aider à évaluer la faisabilité climatique d'une culture dans une projection climatique donnée ; information précieuse et qui aiderait à avancer plus précisément notamment pour concevoir des systèmes plus résilients. Il serait pertinent d'avancer sur ce chantier de paramétrage des outils développés avec l'unité de service INRAE Agroclim pour qu'ils puissent être mobilisés en systèmes maraîchers.

[Le portail web CANARI](#) (Climate ANalysis for Agricultural Recommendations and Impacts), développé par SOLAGRO en partenariat avec Météo-France, est un outil de visualisation d'indicateurs agro-climatiques, calculés à partir de différents modèles et scénarios d'émissions sur la maille DRIAS sélectionnée par l'utilisateur. Des indicateurs généraux sont disponibles (température moyenne,

⁶ Indicateur agro-climatique : identification de dates calendaires pour les stades de début et de fin de phase phénologique. Ce choix implique que les dates de calcul sont identiques pour toutes les années prises en compte pour le calcul.

Indicateur éco-climatique : Calculs sur la base de l'identification d'un modèle de phénologie pour une culture. Le modèle permet le calcul de stades de phénologie chaque année et les indicateurs sont calculés entre ces stades phénologiques, donc les dates sont différentes pour toutes les années prises en compte pour le calcul (source : Centre d'aide de SICLIMA).

nombre de jours de gel...), ainsi que des indicateurs spécifiques à une filière. L'outil présente l'avantage de permettre **la modification manuelle des seuils de réponses et du grain temporel de calcul**. Cependant, il s'agit en premier lieu d'un outil de visualisation : les données sont exportables pour un indicateur donné, mais pas pour un ensemble d'indicateurs. L'utilisation de cet outil n'est donc pas pertinente pour produire un jeu de données de projections climatiques qui donne une vision d'ensemble du climat futur dans le contexte des systèmes maraîchers.

2.5.2 Calcul d'indicateur pour caractériser l'année extrême : pourquoi choisir de prendre la 24^{ème} valeur sur 30 et pas la 30^{ème} ?

Ce choix correspond à une estimation statistique du délai de retour de chaque situation. En prenant la 24^{ème} valeur sur 30, la valeur affichée correspond à une situation qui intervient 1 an sur 5 (seules 6 années sur 30, donc 1 sur 5, ont une situation plus extrême que celle indiquée). Choisir d'afficher la valeur la plus extrême relevée, donc la 30^{ème}, reviendrait à montrer une situation qui revient un an sur 30. Une telle fréquence n'est pas parlante pour imaginer le futur des systèmes maraîchers face au changement climatique : si la situation ne revient qu'un an sur 30, elle ne constitue pas un élément à prendre en compte dans la conduite ou la reconception des systèmes. La nécessité de montrer les extrêmes pour des délais de retour qui restent fréquents a été soulignée par les producteurs interrogés dans le projet CLIMALEG : selon eux, un évènement qui revient 1 an sur 10 (donc la 27^{ème} valeur sur 30) ne les conduirait pas à changer leur stratégie de production (Touili et al., 2023).

2.5.3 Peut-on afficher des dates ? Jusqu'à quel grain temporel peut-on afficher les résultats de calcul des projections ?

Les modèles climatiques renseignent sur l'évolution du climat. Ils simulent des situations météorologiques à des dates précises, mais **ces situations sont virtuelles et ne traduisent pas la météo à une date donnée**. Seule l'agrégation de ces valeurs sur plusieurs années, en général 30 ans, peut être étudiée (DRIAS, s. d.-b). Les dates calculées dans le jeu de données de projections climatiques correspondent aux dates simulées (médiane ou centile sur 30 ans) de franchissement de certains seuils ($T_{max} > 30^{\circ}C$, $T_{min} > 0^{\circ}C$...). Elles n'ont pas vocation à être étudiées en tant que telles, mais plutôt à **estimer l'ordre de grandeur du nombre de jours de décalage** entre la période de référence et la période de projection, et le sens de variation (franchissement plus précoce ou plus tardif).

2.5.4 Peut-on reconstituer les précipitations d'une année en additionnant les cumuls mensuels ?

Le jeu de données de projections climatiques affiche des cumuls mensuels pour certains indicateurs (précipitations, heures de froid, ETP), pour la situation rencontrée l'année normale de la période (1 an sur 2, médiane sur 30 ans) et les années extrêmes sèches ou humides (1 an sur 5, 20^{ème} ou 80^{ème} centile sur 30 ans).

L'année normale traduit donc une situation probable pour chaque mois, et la somme des cumuls mensuels des précipitations de l'année normale peut donc permettre une première approche des précipitations annuelles sur la période.

Cependant, les valeurs pour les années extrêmes traduisent des situations exceptionnelles pour chaque mois. La somme des cumuls mensuels des années extrêmes renseignerait donc sur une année où chaque mois successif serait extrême, indépendamment de l'enchaînement des mois au cours d'une même année. Il n'est donc pas rigoureux de faire la somme des mois secs pour imaginer une année sèche.

2.5.5 Comme se positionne l'année 2022, marquée par des conditions climatiques extrêmes, par rapport à ces projections ?

Cette question traduit le besoin des destinataires de l'étude de positionner les éléments présentés, notamment les valeurs prises par les indicateurs du jeu de données, par rapport à une référence connue et éprouvée récemment. 2022 est considérée comme une année extrême actuellement, et comparer les valeurs observées avec les projections climatiques permet de rendre plus tangibles les valeurs affichées.

Le tableau 2 compare les valeurs observées en 2022 avec les projections 2031-2060 pour une série d'indicateurs. Pour certains d'entre eux, l'année 2022 est moins extrême que les projections (températures moyennes, jours de gel), ce qui correspond à ce qui est attendu intuitivement. Cependant, pour certains indicateurs, les valeurs observées en 2022 sont plus extrêmes que les années extrêmes issues des projections pour 2031-2060. C'est notamment le cas pour les indicateurs de température en été (jours à + de 35°C, maximale atteinte, dates de début et de fin de période de chaleur). Enfin, les valeurs observées de certains indicateurs sont difficilement comparables avec les projections : la période à risque de gel observée en 2022 a un début plus tardif que les projections, mais également une fin plus tardive, et les jours de pluie montrent peu de différence mais les projections sont très variables (cf variabilité et incertitudes en cascade des projections).

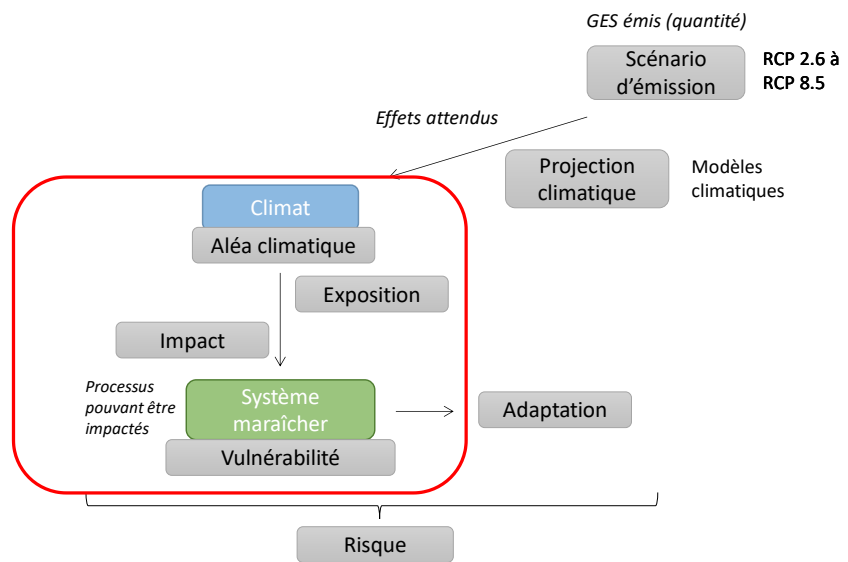
Tableau 2 : Données observées en 2022 (station météo INRAE Domaine Saint-Paul) et données projetées pour 2031-2060 (maille DRIAS 4812 - Avignon) pour une sélection d'indicateurs

Indicateur	Données réelles observées à Avignon en 2022	Projection 2031-2060	
		Année normale	Année extrême
Température moyenne en janvier	5,3 °C	7 °C	8 °C (année chaude)
Température moyenne en juillet	27,8 °C	26,2 °C	27,2 °C (année chaude)
Température maximale atteinte en juillet	38,8 °C	37 °C	38,3 °C (année chaude)
Nombre de jours à + de 35°C en juillet	19	3	7,4 (année chaude)
Premier jour à + de 30°C	14 mai	25 mai	14 mai (année précoce)
Dernier jour à + de 30°C	15 septembre	10 septembre	17 septembre (année tardive)
Nombre de jours avec risque de gel (Tmin>0°C) en janvier	11	5	7,2 (années froides)
Premier jour de risque de gel	22 décembre	6 décembre	21 novembre (année précoce)
Dernier jour de risque de gel	8 mars	22 février	4 mars (année tardive)
Nombre de jours de pluie en novembre	7	6,5	2 (année sèche) 10 (année humide)

La comparaison des valeurs prises par les indicateurs en 2022 avec les projections 2031-2060 a montré que l'année 2022 à Avignon semble plus extrêmes que les années extrêmes 2031-2060, notamment pour les indicateurs liés aux températures en période estivale. Cela peut en partie venir des propriétés des modèles DRIAS décrits comme « optimistes » et cela souligne l'importance de considérer avec précaution les projections à un grain spatio-temporel si « restreint ».

Il est important de rappeler que les valeurs observées tiennent compte des événements extrêmes (canicules, sécheresses, gels précoces ou tardifs) alors que les projections montrent simplement une situation tendancielle climatique possible pour les années futures. Les données réelles sont des observations météorologiques, les projections sont des estimations climatiques. Il n'est donc pas rigoureux de les comparer sans tenir compte de cette distinction. De plus, les projections climatiques comportent plusieurs échelles d'incertitude qui imposent la prudence sur l'interprétation des résultats. Enfin, la méthode proposée dans l'étude présente une faiblesse sur le nombre de modèles utilisés pour établir les projections (voir section Incertitudes sur les projections et limites de la méthode proposée). Face à ces constats, les données réelles de l'année 2022 n'ont pas été mobilisées pour la suite de l'étude pour ne pas induire de conclusions erronées.

3. Impacts et vulnérabilités des systèmes maraîchers du sud de la France face au changement climatique



3 Impacts et vulnérabilités des systèmes maraîchers du sud de la France face au changement climatique

3.1 Introduction et objectifs

Le système climatique évolue en réponse aux émissions de gaz à effet de serre, à la fois de manière tendancielle, mais aussi par des événements ponctuels extrêmes. La méthodologie décrite précédemment a permis d'imaginer comment le climat est susceptible d'évoluer dans la zone d'étude pour ces différentes composantes.

Ces évolutions peuvent avoir un effet, ou impact, sur les systèmes maraîchers qui sont exposés, c'est-à-dire concernés par les évolutions. Dans le cas de l'étude, les systèmes exposés sont l'ensemble des systèmes maraîchers du sud de la France. Si ces systèmes maraîchers sont vulnérables, ils vont être impactés négativement par le changement climatique. **Connaître la vulnérabilité des systèmes est donc impératif pour imaginer comment ils peuvent être impactés** et comment ils pourraient s'adapter.

La vulnérabilité se définit en prenant en compte l'ensemble des processus et pratiques qui constituent les systèmes maraîchers (voir partie 1.2. Définition des termes du sujet page 2) et en identifiant ceux qui peuvent être impactés négativement par les évolutions du climat. Il est nécessaire de savoir

1. Comment le climat affecte les systèmes maraîchers, c'est-à-dire quels paramètres climatiques ont une influence sur quel(s) processus ou pratiques constitutifs de ces systèmes ;
2. Comment l'évolution de ces paramètres est susceptible d'impacter négativement les systèmes maraîchers.

Ces deux étapes permettront de définir quels systèmes sont vulnérables, et en quoi ils le sont. Pour répondre à ces questions, une synthèse bibliographique a été établie à partir de littérature scientifique, de publications techniques, d'articles de presse et de littérature grise. Cette synthèse permet de cerner en première approche les processus et pratiques susceptibles de rendre les systèmes maraîchers vulnérables.

Pour rendre cette synthèse opérante et approcher concrètement **la vulnérabilité des systèmes maraîchers du sud de la France au plus proche des réalités du terrain**, un système cas d'étude a donc été choisi et localisé dans une zone précise, à savoir Avignon. Un collectif d'experts en a identifié les principales sources de vulnérabilité en regard de l'évolution projetée du climat pour cette zone. A l'occasion de cette séquence, **une trame-guide méthodologique a été établie pour conduire d'autres ateliers visant à déterminer la vulnérabilité de systèmes maraîchers.**

La présente partie présente la méthode retenue pour établir la synthèse bibliographique et la démarche d'ateliers, les résultats obtenus et discute ces résultats.

3.2 Synthèse bibliographique : quels paramètres climatiques impactent la production maraîchère, quels impacts attendus du changement climatique et quelles pistes d'adaptation ?

3.2.1 Matériel et méthodes

L'objectif de la synthèse bibliographique est de faire un état de l'art des connaissances sur les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers et sur les pistes d'adaptation⁷, en balayant à la fois la littérature scientifique, mais également les documents techniques, la presse et la littérature grise.

Dans un premier temps, une **revue de littérature scientifique** a été conduite, en se focalisant sur les publications traitant du changement climatique et des systèmes de production maraîchers ou légumiers (recherche via Web of Science des mots clés « climate change », « vegetable », « impacts »). Les publications qui traitent de l'impact des variations d'un ou plusieurs paramètres du climat hors du contexte du changement climatique, ainsi que celles qui ciblent une seule espèce, n'ont pas été intégrées à cette revue. En effet, la plupart des publications intégrées à la synthèse sont des méta-analyses de publications plus ciblées (sur une espèce ou un paramètre), et le niveau de détail fourni par les méta-analyses est suffisant pour l'objet de cette synthèse. Le contexte lié au changement climatique évolue rapidement, aussi les publications ont été retenues uniquement pour des dates de publication de 2018 à 2023. Au total, 4 méta-analyses et une étude exploratoire (Tableau 3) ont été analysées en détail et intégrées. Elles traitent pour la plupart des impacts du changement climatique sur les productions maraîchères ainsi que des pistes d'adaptation associées.

Ensuite, **une revue de presse et de littérature technique** a été initiée pour compléter la revue de littérature scientifique par des éléments plus proches de la zone géographique et du contexte de l'étude. Les sources utilisées pour cette synthèse sont :

- La presse spécialisée (Réussir Fruits&Légumes, Infos CTIFL)
- Les publications du réseau des Chambres d'Agriculture (accès via requête Google, filtre par nom de domaine .synagri.fr, .chambagri.fr, .chambre-agriculture.fr)
- Les publications du réseau CIVAM
- Les sites web des stations d'expérimentation de cultures de légumes du sud de la France (GRAB, APREL, SICA Centrex, SudExpé)

Pour chaque source, la recherche a été effectuée pour une série de mots-clés autour du changement climatique (« *changement climatique* », « *température(s)* », « *canicule(s)* », « *CO2* », « *sécheresse* », « *inondation(s)* », « *extrême(s)* ») et pour une période allant du 1^{er} janvier 2018 au 1^{er} janvier 2023. Pour la recherche sur les sites des chambres d'agriculture, une recherche a également été menée sur le terme « calamité » associé à « légumes » ou « maraîchage ». Le nombre de publications retenues pour chaque source et mot-clé est présenté en Tableau 4.

⁷ La méthode présentée dans cette partie concerne à la fois la synthèse bibliographique des impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers, mais également celle sur les pistes d'adaptation, les deux thématiques étant souvent associées dans la littérature. Les résultats pour le volet « adaptation » sont en partie 4 (Réduire les vulnérabilités).

Tableau 3 : Liste des publications scientifiques intégrées à la synthèse bibliographique

Référence	Type de systèmes	Zone géographique	Type de publication
Bisbis, Mehdi Benyoussef, Nazim Gruda, et Michael Blanke. « Potential Impacts of Climate Change on Vegetable Production and Product Quality – A Review ». <i>Journal of Cleaner Production</i> 170 (janvier 2018): 1602-20. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224 .	Systèmes de production de légumes frais (hors pomme de terre)	Zones tempérées de l'hémisphère Nord et zones méditerranéennes	Méta-analyse des impacts du changement climatique et stratégies d'adaptation
Scheelbeek, Pauline F. D., Frances A. Bird, Hanna L. Tuomisto, Rosemary Green, Francesca B. Harris, Edward J. M. Joy, Zaid Chalabi, Elizabeth Allen, Andy Haines, et Alan D. Dangour. « Effect of Environmental Changes on Vegetable and Legume Yields and Nutritional Quality ». <i>Proceedings of the National Academy of Sciences</i> 115, n° 26 (26 juin 2018): 6804-9. https://doi.org/10.1073/pnas.1800442115 .	Légumes (plein champ et sous abri) et légumineuses	Zones tropicales et subtropicales (en majorité), zones tempérées	Méta-analyse des impacts des variations de paramètres climatiques sur les rendements et la qualité des productions de légumes/légumineuses
Abewoy, Damtew. « Review on Impacts of Climate Change on Vegetable Production and Its Management Practices ». <i>Advances in Crop Science and Technology</i> 06, n° 01 (2018). https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000330 .	Systèmes de production de légumes	Zones tropicales	Méta-analyse des impacts du changement climatique et stratégies d'adaptation
Gruda, Nazim, Mehdi Bisbis, et Josef Tanny. « Influence of Climate Change on Protected Cultivation: Impacts and Sustainable Adaptation Strategies - A Review ». <i>Journal of Cleaner Production</i> 225 (juillet 2019): 481-95. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.210 .	Systèmes horticoles sous abri	Zones tempérées de l'hémisphère Nord et zones méditerranéennes	Méta-analyse sur les impacts du changement climatique et stratégies d'adaptation
Morel, Kevin, et Karine Cartau. « Adaptation of Organic Vegetable Farmers to Climate Change: An Exploratory Study in the Paris Region ». <i>Agricultural Systems</i> 210 (août 2023): 103703. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103703 .	Systèmes maraîchers en agriculture biologique	Île-de-France	Etude exploratoire de la perception du changement climatique par les producteurs et des pistes d'adaptation

Tableau 4 : Nombre de publications retenues à l'issue de la revue de presse et littérature technique (impacts du changement climatique et adaptation au changement climatique). Seuls les mots-clés ayant retourné des résultats sont présentés.

	Réussir Fruits et Légumes	Infos CTIFL	Réseau des chambres d'agriculture	Réseau CIVAM	Stations d'expérimentation
"Changement climatique"	17	7	5	1	2
"Température(s)"	0	2	0	0	0
"Sécheresse(s)"	5	0	0	0	1

Des **éléments issus d'échanges et de conférences** ont également été intégrés à cette synthèse : il s'agit :

- Des échanges sur les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers et les pistes d'adaptation lors de la réunion interne GIS PIClég du 28 novembre 2022
- De la conférence SIVAL « Adaptation au changement climatique pour le maraichage et l'arboriculture en agriculture biologique » du 17 janvier 2023
- Des impacts relevés par les participants à l'atelier méthodologique du 6 avril à l'UE Maraichage d'Alénya (voir Choix des indicateurs).

Pour compléter cette synthèse effectuée sur les cinq dernières années, des publications techniques plus anciennes ont été consultées afin d'identifier des seuils physiologiques propres à certaines cultures maraîchères. L'objectif était d'amener des éléments complémentaires lors des ateliers d'échanges à Avignon, en se focalisant sur les cultures présentes dans la succession choisie comme cas d'étude (laitue, tomate, aubergine, melon ; voir Démarche d'ateliers). Il s'agit des publications suivantes :

- CTIFL. (1995). *Maîtrise de la conduite climatique – Tomate sous serre et abris.*
- CTIFL. (1997). *Les laitues.*
- CTIFL. (2003). *L'aubergine.*
- ITAB. (2017). *Guides Techniques de l'ITAB « Produire des légumes biologiques » Tome 2.*

3.2.2 Résultats

La synthèse bibliographique a permis de mieux cerner les paramètres climatiques influant la production maraîchère, et de voir comment leur évolution en lien avec le changement climatique est susceptible d'impacter les systèmes maraîchers.

L'ensemble des sources consultées a permis de faire ressortir deux paramètres majeurs dont l'évolution est susceptible d'impacter les systèmes maraîchers : **l'augmentation des températures** et **les changements de régimes de précipitations** entraînant des **périodes de sécheresse**. Cependant, de nombreux impacts relevés sont liés à **l'évolution conjointe de plusieurs paramètres climatiques**, et il n'est pas possible de relier strictement un impact à un unique paramètre.

Les impacts possibles du changement climatique sur les systèmes maraîchers concernent **l'ensemble des processus et pratiques qui les constituent**, mais la synthèse bibliographique a permis de mettre en évidence des composantes de ces systèmes qui sont plus susceptibles d'être impactés. Il s'agit de **la croissance des plantes**, de la biologie et les cycles des **bioagresseurs et des organismes bénéfiques**, de la **qualité des produits à la récolte** et du **fonctionnement de l'exploitation agricole**.

La croissance des plantes peut être impactée par une modification (amélioration ou dégradation) de la photosynthèse en lien avec les conditions climatiques (température, taux de CO₂ atmosphérique, manque d'eau) (Bisbis et al., 2018), ou par des arrêts de croissance en conditions extrêmes (ORACLE Grand Est, 2020; SIVAL, 2023). Les températures élevées et le manque d'eau sont les principaux paramètres qui impactent la **qualité des produits à la récolte**, avec des dégâts plus importants (coups de soleil, nécrose apicale, défauts de nouaison...) (Bisbis et al., 2018; Communication GRAB, 2021; Gruda et al., 2019) et une influence variable sur la **qualité nutritionnelle des produits** (Scheelbeek et al., 2018). Les **bioagresseurs déjà présents** sont susceptibles de trouver des conditions plus favorables à leur développement (Abewoy, 2018; CTIFL, 2020c; Gruda et al., 2019; Morel & Cartau, 2023), et des **bioagresseurs émergents** pourraient se développer (CTIFL, 2020b, 2022; Hullé et al., 2010). La biologie des organismes bénéfiques serait également perturbée, avec un risque **d'échec de certaines stratégies**

de lutte biologique face aux nouvelles conditions climatiques et aux pressions accrues en bioagresseurs (Abewoy, 2018 , coll. GIS PIClég).

Enfin, le **fonctionnement de l'exploitation** est susceptible d'être affecté, avec des cycles de cultures plus variables qui compliquent **l'organisation des calendriers cultureux** (Gruda et al., 2019; Morel & Cartau, 2023; SIVAL, 2023), et des épisodes climatiques extrêmes qui menacent la **santé des personnes et dégradent l'outil de travail** (SIVAL, 2023, coll. GIS PIClég novembre 2022, coll. UE Maraîchage 6 avril 2023).

L'ensemble des impacts possibles du changement climatique sur les systèmes maraîchers relevés dans la bibliographie sont compilés de façon plus exhaustive dans un tableur Excel⁸, avec une entrée par paramètre climatique ou par processus/pratique.

3.2.3 Limites de la synthèse bibliographique

La synthèse a permis d'identifier des impacts possibles du changement climatique en production maraîchère, pointant les principaux **paramètres climatiques** dont l'évolution est susceptible d'impacter les systèmes maraîchers. Elle permet également de mieux cerner **les processus et les pratiques** constitutifs des systèmes maraîchers qui pourraient connaître des impacts.

Cependant, la synthèse n'est qu'une première approche, et elle comporte des limites. D'une part, elle montre les impacts d'une évolution générique du climat (ex : augmentation de la température), et pas de l'évolution attendue des paramètres climatiques dans une zone spécifique. **Elle peut donc servir de guide, mais n'est pas opérante pour se projeter dans l'action.** De plus, les impacts relevés concernent une large gamme d'espèces et de contextes de production, la plupart des éléments étant issus de méta-analyses sur des zones géographiques étendues. La synthèse ne peut donc pas être utilisée seule pour imaginer les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers du sud de la France par exemple. C'est pourquoi elle a été complétée par l'expertise des acteurs de la production maraîchère dans la zone d'étude, afin d'évaluer les vulnérabilités des systèmes de manière plus opérante.

3.3 Démarche d'ateliers

3.3.1 Matériel et méthodes

Pour évaluer la vulnérabilité des systèmes maraîchers du sud de la France, il est nécessaire d'établir les liens entre climat et vulnérabilité au plus proche des dimensions opérationnelles de ces systèmes. Pour cela, l'expertise des acteurs de la production maraîchère dans le sud de la France est une ressource complémentaire aux éléments issus de la bibliographie. Une démarche d'atelier multi-acteurs a donc été initiée, avec pour objectifs de :

- Identifier comment les connaissances disponibles (évolution du climat, impacts possibles du changement climatique) aident à évaluer concrètement le niveau de **vulnérabilité** d'un système maraîcher
- Réfléchir aux pistes **d'adaptation** existantes ou à créer pour réduire cette vulnérabilité.

La démarche d'atelier a donc pour vocation d'être un **espace de discussion pour l'appropriation des données et concepts autour du changement climatique en maraîchage**, et pour la **reconception et l'adaptation des systèmes maraîchers**.

⁸ Ce fichier ne peut être mis en page pour édition mais disponible sur demande à amelie.lefevre@inrae.fr

Les participants visés sont les acteurs directement concernés par la production maraîchère, à savoir :

- des conseillers en maraîchage conventionnel ou biologique (expertise généraliste en maraîchage)
- des ingénieurs et techniciens en stations d'expérimentation (expertise généraliste en maraîchage ou ciblée à une espèce)
- des chercheurs et chefs de cultures de dispositifs expérimentaux INRAE (expertise généraliste en maraîchage ou ciblée à un processus/pratique)

La participation de producteurs n'a pas été envisagée, en raison de la date de l'atelier, en pleine saison de production. Nous avons estimé que les conseillers pouvaient faire office de relais des réalités de terrain. Si d'autres ateliers sont mis en place, ils pourraient inclure des producteurs.

La démarche d'atelier proposée se déroule en 3 temps successifs :

- Temps [1] de présentation des données climatiques
- Temps [2] de diagnostic partagé de la vulnérabilité d'un système cas d'étude face au changement climatique, après un temps d'échanges sur les données climatiques et le climat futur, ainsi que sur le cas d'étude choisi
- Temps [3] de réflexion collective sur les manières de rendre le système moins vulnérable et les pistes d'adaptation.

Les deux premiers temps seront détaillés ci-dessous, et le dernier dans la partie 4 (Réduire les vulnérabilités).

A noter - La démarche d'atelier présentée dans cette partie et en partie 4 a pour vocation d'être reproductible dans d'autres territoires, pour multiplier les diagnostics de vulnérabilité et de pistes d'adaptation sur différents cas d'étude sur toute la zone du sud de la France. Il était prévu de tester la méthode sur deux cas d'études dans le cadre de cette étude (un cas sous abri et un cas en plein champ) et sur deux territoires, afin d'éprouver la démarche. Or, le calendrier et les disponibilités des participants potentiels n'ont permis d'effectuer qu'un seul test, portant sur un système sous abri dans la région d'Avignon, le 12 juillet 2023. La méthode est donc susceptible d'évoluer si des tests supplémentaires sont mis en place.

3.3.1.1 Présentation des données climatiques

L'objectif de ce temps [1] est d'apporter des connaissances aux acteurs participants sur l'évolution possible du climat dans la zone d'étude choisie pour l'atelier, afin de partager une vision commune et de pouvoir plus facilement imaginer la vulnérabilité du système choisi comme cas d'étude. Lors de cette séquence, la méthodologie déroulée en partie 2 (voir Matériel et méthodes) est expliquée avec pour support le jeu de données produit pour une maille DRIAS sur la zone d'étude, ainsi que les hypothèses de réflexion sur les sécheresses.



A l'issue de la présentation, les participants sont capables de comprendre la méthodologie de production du jeu de données et des hypothèses, et d'étudier en autonomie ces supports.

Pour l'atelier en Avignon, ce temps de présentation a été réalisé dans un format webinaire en amont de l'atelier. Le format retenu est un webinaire de 1h30, avec 1h de présentation et 30 minutes d'échanges.

3.3.1.2 Diagnostic de vulnérabilité d'un système de culture cas d'étude

Ce temps [2] vise à évaluer la vulnérabilité du système cas d'étude face au changement climatique, en fonction de l'évolution possible du climat.

Lors de l'atelier, deux étapes préalables au diagnostic de vulnérabilité ont été organisées :

1. Une immersion collective dans les données présentées en webinaire, pour imaginer le climat futur dans la zone d'étude ;
2. Une phase de calibrage collective du cas d'étude c'est-à-dire d'un système de culture de référence pour correspondre au mieux aux réalités du territoire.

Quel climat demain ?

La phase « Quel climat demain ?⁹ » permet de pousser les participants à s'approprier les ressources transmises lors du webinaire (temps [1]). Par binôme, ils travaillent sur une partie des données pour imaginer le climat futur, puis restituent au groupe les points majeurs d'évolution avec le climat actuel. Lors de l'atelier du 12 juillet, les binômes se sont constitués ainsi :

- Binôme 1 : indicateurs liés aux températures hautes (1 à 6)
- Binôme 2 : indicateurs liés au gel et aux températures basses (7 à 12)
- Binôme 3 : indicateurs liés aux précipitations (13 à 18)
- Binôme 4 : indicateurs liés à la sécheresse (19 à 20 + hypothèses de réflexion)

Les indicateurs 20 à 24, spécifiques des productions maraîchères, n'ont pas fait l'objet d'une restitution au groupe, car ils sont moins utiles pour caractériser le climat.



A l'issue de cette étape, les participants partagent une vision précise du climat attendu sur le territoire. Cette phase permet également de préciser l'ensemble des incertitudes liées à ces projections (voir Incertitudes sur les projections et limites de la méthode proposée). Ils sont sensibilisés à l'enjeu des événements climatiques extrêmes telle que la sécheresse impactant la capacité d'irrigation.

Définition du système de culture cas d'étude

En amont de l'atelier, la succession culturale cas d'étude a été construite pour représenter un système pratiqué dans la zone d'étude sous abri froid de pleine terre, à savoir la zone d'Avignon pour l'atelier test du 12 juillet. Afin d'obtenir le système le plus cohérent avec les réalités du territoire, des conseillers en maraîchage du secteur et des typologies régionales d'exploitations ont été mobilisés pour définir une succession culturale-type et le type d'exploitation associée.

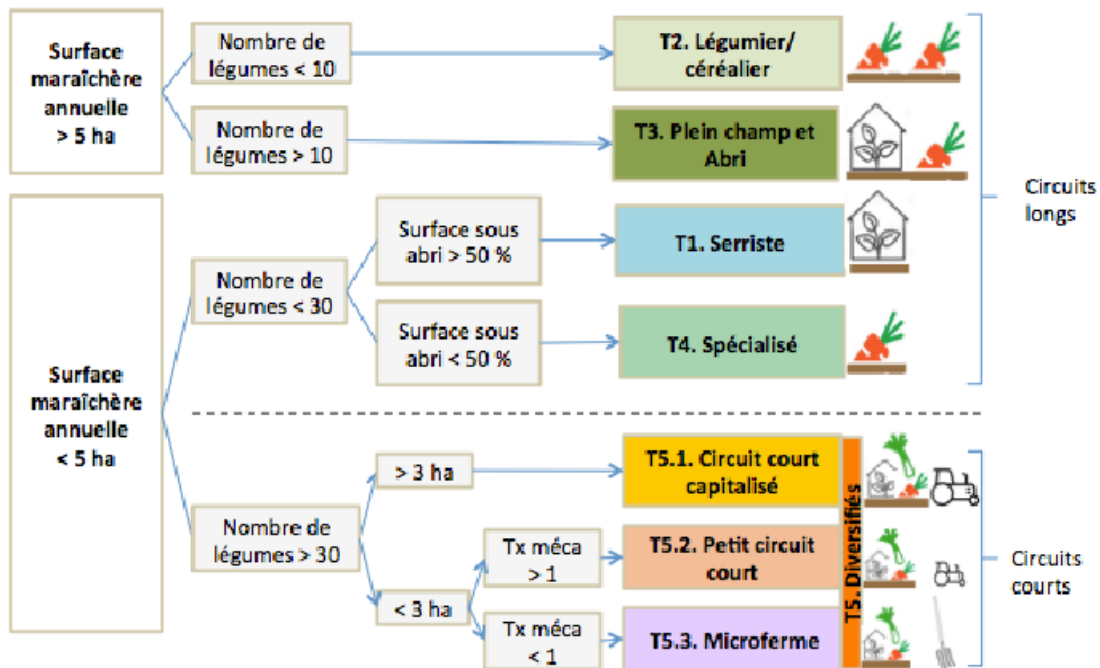
La typologie de l'exploitation dans laquelle se place le système choisi est inspirée de la typologie (Tableau 5) réalisée par Bio de PACA (Bio de PACA, 2020). Il s'agit **d'une exploitation diversifiée, d'une surface minimale de 3 ha, avec 10 à plus de 30 espèces différentes cultivées sous abri et en plein champ. La commercialisation des produits se fait en circuit long ou en circuit court.** Le choix de ce type d'exploitation vise à exclure les exploitations très spécialisées (légumes en rotation avec des céréales, exploitation spécialisée de plein champ ou serriste) ainsi que les microfermes ; types qui ont été considérés comme éloignés du périmètre cible de la présente étude.

Ensuite, des échanges ont eu lieu avec des conseillers du Gard et du Vaucluse, avec l'objectif initial de réaliser deux ateliers : un portant sur un cas d'étude plein champ et un sous abri au sein d'une

⁹ Etape initialement mal nommée « « Bulletin météo 2045 » pour l'image, mais à éviter car confond prévision climatique et météorologique.

exploitation diversifiée telle que décrite dans la typologie. La production maraîchère de plein champ au sein de ce type de structures semblait plus représentative des systèmes gardois, et la production sous abri de ceux du Vaucluse. Peu de participants étant disponibles sur la période, et les personnes disponibles connaissant plutôt les systèmes de Vaucluse, il a été décidé de ne faire qu'un atelier test, **sur un système sous abri à Avignon.**

Tableau 5: Typologie des exploitations maraîchères de PACA selon Bio de PACA, 2020. L'exploitation du cas d'étude correspond au type T3 ou T5.1



Lors du webinar du 29 juin, une succession-type, construite à partir d'échanges avec les conseillers de la zone d'étude et de la typologie des exploitations, a été présentée (voir Figure 9). Les participants au webinar ont pu effectuer des premiers retours, qui ont été pris en compte pour proposer une version amendée de la succession (Figure 10).

	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Année n	Tomate												Salade 1																																							
Année n+1	Salade 2						Melon												Salade 1																																	
Année n+2	Salade 2						Aubergine												Salade 1																																	
Année n+3	Salade 2																																																			

Figure 9 : Succession présentée le 29 juin

	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Année n	Tomate												Salade 1																																							
Année n+1	Salade 2						Melon												Engrais vert						Salade 1																											
Année n+2	Blette						Aubergine												Salade 1																																	
Année n+3	Salade 2																																																			

Figure 10: Succession présentée le 12 juillet

Dans le temps [2], le calibrage final du cas d'étude permet de recueillir les retours des participants sur cette succession. En effet, la typologie de l'exploitation et le choix de la succession-type doivent être cohérents et refléter les réalités connues des participants. Selon ces retours, la succession-type est modifiée (choix des espèces, dates de plantation/récolte approximatives, position des espèces dans la succession) et affichée afin de servir de support pour la phase de diagnostic.

Diagnostic de vulnérabilité du système cas d'étude

A l'issue de ces deux phases préalables, le diagnostic de vulnérabilité de la succession cas d'étude est amorcé. La succession de culture est affichée, ainsi que la question de travail :

« Compte tenu des éléments présentés et de votre expertise, **quelles sont les vulnérabilités que vous identifiez pour le système de culture présenté ?** ».

La succession affichée est annotée au fur et à mesure des échanges, en traçant si la vulnérabilité évoquée concerne les plantes (une ou plusieurs espèces de la succession : prise de note sur la moitié supérieure du tableau) ou l'exploitation (sol, eau, organisation : prise de note sur la moitié inférieure du tableau, voir Figure 11). Des relances d'animation sont effectuées pour balayer l'ensemble des processus et pratiques identifiés dans la synthèse bibliographique comme potentiellement vulnérables, en utilisant la trame de l'enquête auprès des membres du GIS PIClég (voir Annexe 1). Un créneau d'une heure est prévu pour cette phase.

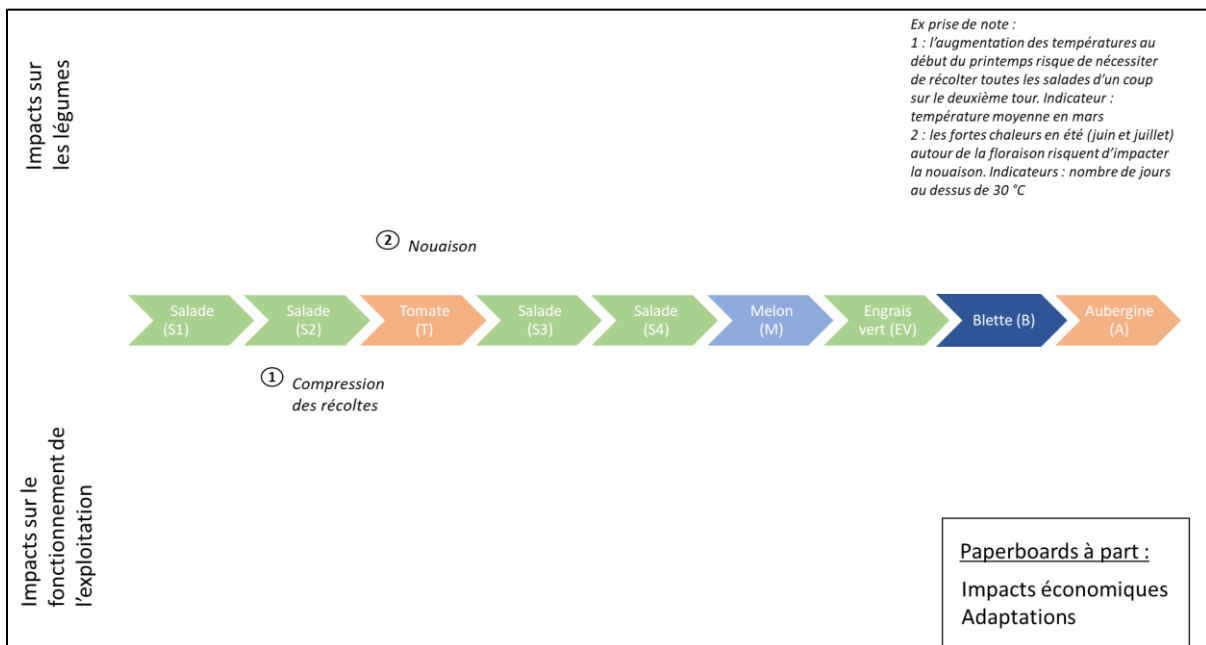


Figure 11 : Organisation prévue de la prise de note pour le diagnostic de vulnérabilité

Des « **fiches impacts** » ont été distribuées aux participants afin de servir d'amorce aux échanges. Elles reprennent, pour les espèces de la succession, l'ensemble des impacts potentiels relevés dans la synthèse bibliographique, ainsi que les seuils physiologiques d'intérêt pour chaque espèce (voir annexe 8.4). Les fiches n'ont finalement pas été mobilisées par les participants lors des échanges.

A l'issue des échanges, les participants assignent collectivement une note de vulnérabilité au système, entre 1 (pas du tout vulnérable) et 4 (très vulnérable).

3.3.2 Atelier-test : diagnostic de vulnérabilité d'un système cas d'étude à Avignon

3.3.2.1 Participants

Au total, 22 participants potentiels ont été contactés pour participer au webinar du 29 juin et à l'atelier du 12 juillet (voir Tableau 6). Le suivi du webinar étant nécessaire au bon déroulé de l'atelier du 12 juillet, un enregistrement vidéo a été effectué pour permettre à des participants indisponibles le 29 juin de participer à l'atelier du 12 juillet.

Tableau 6 : Nombre et profil de participants contactés pour participer à l'atelier du 12 juillet à Avignon

Profil de participant	Nombre de personnes contactées
Conseillers en maraîchage conventionnel ou biologique	6
Ingénieurs et techniciens en stations d'expérimentation	6
Chercheurs et chefs de cultures de dispositifs expérimentaux INRAE	10

Au total, 8 participants ont participé à l'atelier du 12 juillet. La plupart d'entre eux a une expertise plutôt généraliste en maraîchage en agriculture conventionnelle ou biologique (voir Tableau 7), et sont basés sur le territoire d'Avignon ou à proximité (Gard, Var). La majorité ont pu suivre le webinar du 29 juin afin de préparer les échanges, à l'exception de deux participants qui ont cependant pu visionner en différé la capture vidéo.

Tableau 7 : Participants à l'atelier du 12 juillet selon la structure et le domaine d'expertise

Structure	Domaine d'expertise
Ingénieur d'expérimentation APREL	Expertise généraliste des systèmes maraichers de Provence (tomate, salade, aubergine, courgette, pathogènes du sol...)
Ingénieur d'expérimentation CTIFL	Melon / courges surtout plein champ, gestion de l'eau et irrigation
Chercheur INRAE	Systèmes maraîchers, maladies du sol
Ingénieur expérimentateur INRAE	Conduite de culture arboriculture et maraîchage plein champ et abri,
Conseiller Chambre d'Agriculture du Var	Expertise généraliste maraîchage AB
Conseiller Chambre d'Agriculture de Vaucluse	Expertise généraliste maraîchage conventionnel et AB
Conseiller Agribio Var	Expertise généraliste maraîchage biologique
Stagiaire INRAE	Données climatiques et indicateurs

3.3.2.2 Quel climat demain ? (Ex « « bulletin météo » »)

Une vision partagée du climat futur d'Avignon a été construite collectivement à partir des projections. Les participants identifient les éléments marquants : des étés plus chauds et plus longs, des hivers plus chauds avec moins de risque de gel (à l'exception du mois de février), et des automnes plus chauds, possiblement moins pluvieux et où le sol est plus sec. Peu de variations ont été relevées pour le printemps en dehors d'une augmentation de l'ETP et des jours de sol sec en mai.

Les éléments évoqués par les participants ont été repris sur un support affiché dans la salle pendant la suite de l'atelier, afin de garder une trace du climat projeté pour les échanges.

3.3.2.3 Cas d'étude et succession type

Cette succession révisée (Figure 10) a été mise en discussion le 12 juillet afin d'arrêter le cas d'étude et de diagnostiquer la vulnérabilité de la succession.

Les modifications concernent surtout les dates de plantation et de fin de récolte (en commençant par positionner les cultures d'été). Les plus gros changements sont la suppression d'un cycle de salade le

premier hiver, qui a été jugé incompatible avec la plantation d'une culture précoce de melon sous abri (sur un seul jet). L'hiver composé de deux cultures de salade successives a été placé après l'engrais vert de l'été 2 ; ce qui donne de la marge de manœuvre pour travailler le sol et planter le 1^{er} tour de salade plus précocement début octobre. La succession retenue pour la suite de l'atelier (Figure 12) intègre donc l'expertise des participants et leur connaissance d'exploitations et de systèmes de culture similaires.

	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Année n											Tomate (greffée)																	Salade (1 seul tour)																								
Année n+1											Melon						Engrais vert						Salade 1																													
Année n+2	Salade 2												Aubergine																																							
Année n+3																			Blette																																	

Figure 12 : Succession retenue le 12 juillet après ajustements par les participants



Les participants prennent un moment pour s'accorder sur la succession culturelle en prenant en compte les pratiques usuelles et le calendrier (à la semaine calendaire) pour ensuite partir sur un cas d'étude consensus pour la suite de l'atelier.

3.3.2.4 Diagnostic de vulnérabilité d'un système de culture maraîcher sous abri en Avignon

En prenant pour cas d'étude la succession culturelle construite collectivement, les participants ont pu échanger pendant 50 minutes sur les périodes (voire moments-clé dans l'année) de vulnérabilité de ce système face au changement climatique, en gardant en mémoire la vision partagée du climat futur d'Avignon.

Les échanges se sont initiés rapidement, en commençant par les vulnérabilités de la tomate (première culture de la succession), puis la discussion a rapidement basculé vers des vulnérabilités qui concernent plusieurs espèces, voire le système dans son ensemble et l'exploitation. Le visuel de la prise de note par les animateurs lors de l'atelier est visible en annexe 8.5.

Au total, **25 sources de vulnérabilité ou d'incertitude** ont été relevés par les participants, répartis ainsi [[lien aux paramètres climatiques en bleu quand explicité par les participants](#)] :

- Vulnérabilités qui concernent **une espèce** de la succession (9) :
 - Tomate (3) : risques de perte de production avec des défauts de nouaison, de pollinisation, des problèmes sanitaires (acariens) et de croissance, déséquilibre végétatif/génératif (coulure...), réduction de la durée du cycle de culture avec plantes trop affaiblies dans l'été et modulation du climat sous abri insuffisante [[trop fortes températures en plein été, pics de chaleur notamment précoces ; été très chauds et secs propices aux infestations précoces et massives d'acariens tétranyques](#)]
 - Melon (1) : problèmes d'échelonnement des récoltes [[accélération des cycles cultureux par la température](#)]
 - Salade (4) : problèmes de qualité (montaison, défauts de pomaison [[par excès de température](#)] ; problèmes de couleur en feuille de chêne rouge), de croissance [[risque de gel en fin de cycle](#)], de commercialisation (des cycles raccourcissent par la température ce qui entraîne des pertes si les marchés ne suivent pas) – nécessité de bien suivre les innovations variétales [choisir des cultivars [adaptés aux créneaux très précoces risquant d'avoir des températures élevées, faible hygrométrie en début de cycle](#)] ; à noter probable réduction du risque fongique tel que pourriture grise si [baisse de l'hygrométrie \[moins de précipitations à l'automne\]](#)
 - Aubergine (1) : avantages sanitaires (pression verticilliose en baisse [[moindre risque de sol froid en fin d'hiver et de stagnation de l'eau en début de cycle](#)])

- Vulnérabilités qui concernent **le système de culture ou l'exploitation** (14)
 - Bioagresseurs et organismes bénéfiques (6) : arrivée plus précoce [absence de gel pour réduire l'inoculum en hiver, hiver plus doux maintien d'une population en permanence, atteinte des seuils minimum plus tôt] et raccourcissement des cycles des mouches, noctuelles, chenilles [qui répondent aux températures] et baisse de mortalité hivernale, risques de pullulation de nématodes à galles et perte de résistance [accélération de leur cycles par la température du sol plus élevée et perte de résistances des porte-greffe si > 30°C] ; apparition de nouvelles espèces de milieux chauds [pouvant se maintenir dans un climat plus doux], risque de perte d'efficacité des produits phytosanitaires et de biocontrôle [à haute température] et de phytotoxicités (que ce soit des produits de biocontrôle, AB ou de synthèse), problèmes pour implanter ou baisse d'activité des macroorganismes utiles [auxiliaires affectés par les fortes chaleurs, le manque d'hygrométrie (ex *Aphidius* sp.) ou à l'inverse favorisés en hiver plus doux (ex chrysopes en salade)] et risque de perte d'activité des bourdons en tomate ou melon [forte chaleur]
 - Fonctionnement et structure du sol (2) : problèmes pour mettre en place les engrais verts [réduction de la disponibilité en eau, espèces sensibles à la chaleur et aux acariens stimulés en été chaud et sec], risque pour la vie du sol (sur-minéralisation ; risque mal contrôlé entre l'excès de chaleur, un sol vite sec si arrêt de l'arrosage...)
 - Disponibilité de l'eau (1) : augmentation de l'ETP donc des besoins [forte température, sécheresse ou défaut de précipitations locales ou sur le lieu d'alimentation de la ressource en irrigation, impacts sur captage, ...]
 - Fonctionnement de l'exploitation (5) : difficulté de trouver du personnel [conditions de travail à risque - températures élevées et sur longue durée sous abri ou plein champ], plus d'interventions de vibrage en tomate et melon si bourdons ne sortent pas [forte chaleur], difficultés à organiser les calendriers de production (anticiper, décaler) à l'échelle de l'exploitation et du bassin de production, risques de suppression de cultures dans les rotations au calendrier trop serré [température accélère les cycles culturaux], capacité à réagir et s'ajuster selon la survenue d'événements extrêmes ponctuels [pics de chaleurs, très fortes pluies, forts orages localisés], problèmes de croissance en culture d'été trop blanchies, problèmes pour enlever le blanchiment en absence de pluie

Bien que les échanges aient débuté par des vulnérabilités propres à une seule espèce, cette espèce a en réalité servi de **point d'entrée pour évoquer des dimensions plus systémiques**, qui ont dominé les échanges à la fois en nombre de vulnérabilités relevées (14/23), mais surtout en termes de temps, la plupart de la séquence ayant été destinée à ces points. En effet, les vulnérabilités des systèmes maraîchers face au changement climatique ne sont pas seulement liées au fonctionnement de la parcelle cultivée (physiologie des espèces cultivées, fonctionnement du sol), mais également à l'organisation de l'exploitation (planification des cultures, organisation du travail), à l'accès aux ressources (eau), à l'organisation des marchés (décalage des dates de récolte). Ces sources de vulnérabilité ne peuvent être envisagées uniquement à l'échelle de la plante ou du sol. Cela traduit l'importance d'une réflexion à l'échelle d'un système de culture, d'une exploitation, voire même d'un territoire ou d'un bassin de production. Cette conclusion est cependant à nuancer par le fait que la plupart des participants présentent une expertise généraliste des cultures maraîchères. La présence de spécialistes (par exemple des spécialistes de processus de résistances génétiques, d'écophysiologie ou des cycles biologiques des organismes ravageurs ou auxiliaires) aurait permis de confronter ces deux aspects et d'enrichir les discussions.

La **question de l'accès à l'eau d'irrigation** a été relativement peu évoquée au cours des échanges, notamment en raison de la situation particulière du bassin de production d'Avignon, irrigué par l'eau de la retenue de Serre-Ponçon et donc jusqu'alors rarement concerné par des restrictions d'usage. Cependant, les participants d'autres départements (Var et Gard) ont fait ressortir l'importance capitale de cette thématique dans leurs territoires et l'enjeu majeur pour les producteurs. Cela justifierait de proposer lors d'un tel atelier, un scénario plus en rupture avec la réalité en simulant une baisse majeure de la disponibilité en eau (ici du barrage de Serre-Ponçon). Cela milite aussi pour organiser ce même type d'ateliers dans d'autres territoires.

3.3.3 Points d'amélioration pour le temps [2] de l'atelier « diagnostic de vulnérabilité »

L'atelier du 12 juillet a globalement atteint ses objectifs : partager une vision du climat futur sur la zone d'Avignon et évaluer la vulnérabilité d'un système cas d'étude face à ces évolutions. Le découpage des séquences (quel climat demain, choix du cas d'étude, diagnostic de vulnérabilité) a fonctionné et a permis de guider les échanges.

La séquence 'quel climat demain ?' a été appréciée par les participants qui ont jugé plus facile de prendre connaissance du jeu de données de projections climatiques par ce format. Le temps prévu pour cette phase était cependant trop court, et la difficulté de prendre note des points marquants de manière visuelle a fait que les résultats de cette phase n'ont pas toujours été mobilisés dans la suite des échanges. Ce point serait à améliorer dans de futurs ateliers, **en trouvant une manière de mettre les évolutions climatiques en regard de la succession culturale lors de la réflexion autour de la vulnérabilité**, et en intégrant des relances d'animation pour s'assurer du lien au climat.

Les phases de mise en discussion du cas d'étude, puis de diagnostic de vulnérabilité, ont pu se dérouler de la manière dont elles avaient été prévues. Les participants ont eu besoin de peu de relances pour identifier les moments de vulnérabilité du système.

Cependant, les fiches impacts, qui reprennent un extrait de la synthèse bibliographique pour les espèces du cas d'étude (annexe ANNEXE 4 - Fiches impacts), n'ont pas été mobilisées par les participants lors de leurs réflexions. Ils ont néanmoins cité une partie importante des éléments pré-identifiés dans ces fiches, à plus forte raison pour ceux qui concernent plusieurs espèces ou le système de culture dans son ensemble. Pour de futurs ateliers, la place de ces fiches dans l'animation serait donc à réévaluer.

Les échanges et leur analyse ont permis de montrer l'importance de réaliser d'autres ateliers pour éprouver la méthode, avec

- (1) des participants aux domaines d'expertise plus hétérogènes, par exemple avec des spécialistes d'une espèce ou d'un processus physiologique,
- (2) dans d'autres contextes géographiques et climatiques, notamment des zones déjà concernées par des problématiques liées à l'eau,
- (3) en prenant pour cas d'étude d'autres systèmes, plus spécifiquement des systèmes plein champ.

3.4 Réponses aux questions fréquentes sur le périmètre de la synthèse bibliographique et la démarche d'atelier

3.4.1 Pourquoi ne pas se focaliser sur une espèce et sa phénologie pour approfondir la bibliographie ?

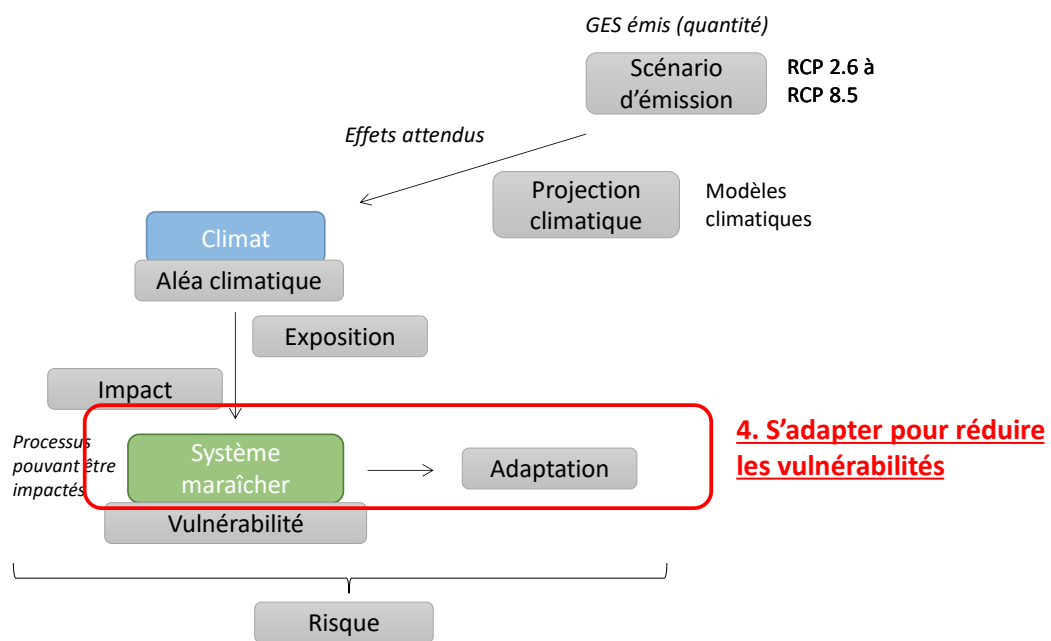
L'approche de la vulnérabilité des systèmes par l'évaluation de l'effet du climat sur la phénologie d'une espèce est utilisée en viticulture, grandes cultures et certaines espèces d'arboriculture fruitière. Ces

systemes sont basés sur une seule espèce (vigne) ou sur une faible diversité d'espèces (grandes cultures, vergers fruitiers type pommiers). L'évaluation des impacts du changement climatique sur ces espèces permet donc d'approcher les impacts pour l'ensemble du système y compris des filières.

En maraîchage, la diversité des contextes de production, des espèces et des familles botaniques complexifie le choix d'espèces modèles. En se focalisant sur une espèce, on apporterait une information sur les vulnérabilités de systèmes basés sur cette espèce, qui ne correspondent pas à la majorité des contextes de production. Afin de produire des connaissances sur les systèmes maraîchers dans leur diversité, la synthèse bibliographique n'a donc pas ciblé d'espèces. Pour réfléchir au plus proche de la réalité de terrain lors de la phase d'ateliers, une succession culturale type a été construite, et la bibliographie a pu être complétée pour approcher les paramètres climatiques et les seuils auxquels répondent les cultures de la succession. Cette méthode permet de cibler un ensemble d'espèces correspondant à la réalité de production d'un territoire, en faisant intervenir l'expertise des acteurs concernés.

3.4.2 Pourquoi se focaliser sur un système sous abri et pas en plein champ ?

L'objectif initial était d'aborder la démarche par les systèmes de pleine terre sous abri et en plein champ. Ces deux types de système recouvrent des dimensions différentes et sont régulièrement en complémentarité dans les exploitations. Si les systèmes sous abri comme les systèmes de plein champ sont impactés par le changement climatique, la liste et la priorité des indicateurs agro-climatiques peut différer. En l'état c'est un manque de temps et de disponibilité de participants aux ateliers qui a écarté les systèmes de plein champ des activités finales de cette étude. La même démarche (modulo une actualisation de la liste des indicateurs climatiques à calculer) est applicable en plein champ.



4 Réduire les vulnérabilités

4.1 Introduction et objectifs

Le changement climatique peut impacter les systèmes maraîchers qui sont exposés à ses évolutions : s'ils sont vulnérables, ces impacts seront négatifs. Les précédentes parties ont permis de déterminer l'évolution projetée du climat à laquelle les systèmes maraîchers du Sud de la France sont exposés, puis, pour un système cas d'étude, d'évaluer sa vulnérabilité face aux changements du climat.

Les systèmes exposés et vulnérables peuvent s'adapter : **l'adaptation** est la démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu et à ses conséquences pour éviter les effets négatifs (ou exploiter de potentiels avantages). S'adapter, c'est donc réduire la vulnérabilité des systèmes maraîchers pour éviter les impacts négatifs du changement climatique.

Il est donc nécessaire, pour un système maraîcher donné :

- (1) d'identifier les sources de vulnérabilité du système : c'est l'objet de la partie 3 (Impacts et vulnérabilités des systèmes maraîchers du sud de la France face au changement climatique)
- (2) d'identifier comment réduire cette vulnérabilité, soit en concevant des systèmes peu vulnérables, soit en identifiant pour chaque source de vulnérabilité les pistes d'adaptation pour la réduire.

Pour traiter ces questions, deux activités successives ont été mises en place dans l'étude. D'une part, une synthèse bibliographique a été conduite pour balayer les pistes d'adaptations existantes face aux effets du changement climatique. Cette synthèse a été effectuée en parallèle de celle concernant les impacts possibles du changement climatique sur les systèmes maraîchers. Ensuite, une démarche d'atelier a permis, après avoir évalué les vulnérabilités d'un système cas d'étude, de réfléchir aux manières de le rendre moins vulnérable face au changement climatique. La suite de cette partie présentera la méthode de travail et les résultats de ces deux temps successifs.

4.2 Synthèse bibliographique : quelles pistes d'adaptation pour faire face aux impacts du changement climatique en maraîchage ?

4.2.1 Matériel et méthodes

Voir partie 3 – Matériel et méthodes – Synthèse bibliographique (page 27)

Les pistes d'adaptations au changement climatique peuvent être de différentes natures (*Launay M., intervention GIS PICléq, novembre 2022*) :

- **incrémentielle** : faire face à une situation différente mais qui correspond à des conditions déjà rencontrées,
- **systemique** : modification à l'échelle pluriannuelle de la manière de cultiver pour correspondre à une situation nouvelle qui s'installe,
- ou **transformante** : modifications plus profondes qui dessinent un nouveau paysage agricole.

Lors de l'analyse des résultats de la synthèse bibliographique et de l'atelier-test, cette catégorisation sera utilisée.

4.2.2 Résultats

La synthèse bibliographique, ainsi que le recensement des projets de recherche et d'expérimentation liés au changement climatique, ont permis de mettre en évidence des pistes d'adaptation déjà pratiquées, ainsi que des voies possibles pour imaginer de nouvelles pistes d'adaptation. L'ensemble

des éléments identifiés dans la phase de bibliographie et les différents projets en cours sont recensés dans un tableur Excel¹⁰. Les pistes recensées peuvent être regroupées en 3 thématiques : la modification des pratiques culturales, l'investissement dans de nouveaux équipements, et l'économie des exploitations.

Les pistes d'adaptation en lien avec **les pratiques culturales** sont majoritairement des adaptations incrémentielles. Elles concernent notamment le développement de nouvelles variétés, en réponse à des problématiques spécifiques comme la résistance à la sécheresse ou la sensibilité à la montaison (Bisbis et al., 2018; Gruda et al., 2019; Morel & Cartau, 2023) ou globalement plus résilientes aux conditions climatiques variables (Abewoy, 2018). Pour répondre aux impacts du changement climatique sur les bioagresseurs, la diversification et la multiplication des applications de produits de protection des cultures (Bisbis et al., 2018) et la connaissance des conditions optimales d'installation des auxiliaires (CTIFL, 2020a) sont également citées. L'adaptation aux températures élevées et au manque d'eau pourrait passer par le développement du greffage (Abewoy, 2018; Bisbis et al., 2018), de l'ombrage en plein champ (Abewoy, 2018; Bisbis et al., 2018) ou du paillage et des mulchs végétaux (Abewoy, 2018; Bisbis et al., 2018; Morel & Cartau, 2023). Des changements de pratiques d'ordre plus systémique sont également évoquées en lien avec les pratiques culturales: intégration d'engrais verts (Morel & Cartau, 2023) et réduction ou arrêt du travail du sol (Bisbis et al., 2018; Morel & Cartau, 2023). Des pratiques d'ordre systémiques ou transformantes sont également envisageables : modifier les calendriers culturaux pour s'adapter aux nouvelles conditions climatiques et ainsi décaler les cycles de culture vis-à-vis des périodes climatiques à risque (Abewoy, 2018; Morel & Cartau, 2023), développer des systèmes agroforestiers et diversifier les espèces produites (Morel & Cartau, 2023).

Les pistes d'adaptation en lien avec **l'investissement dans de nouveaux équipements** peuvent être incrémentielles, avec le développement de la protection physique contre les ravageurs (Bisbis et al., 2018; Morel & Cartau, 2023), le changement des systèmes d'irrigation vers du goutte-à-goutte (Morel & Cartau, 2023) ou l'amélioration des abris pour mieux maîtriser le climat (Gruda et al., 2019). Elles peuvent également être plus systémiques, avec le développement de la culture sous abri (Bisbis et al., 2018; Gruda et al., 2019; Morel & Cartau, 2023) et la mise en place d'équipements de stockage de l'eau (Bisbis et al., 2018).

L'adaptation au changement climatique pourrait nécessiter de **repenser le modèle économique des exploitations** : ces évolutions systémiques voire transformantes pourraient impliquer un changement de modes de commercialisation, de critères d'accès à la commercialisation quelque soit le type de circuit, ou une organisation de filière permettant la complémentarité entre territoires (Gruda et al., 2019; Morel & Cartau, 2023).

Bien que de nombreuses pistes soient citées pour s'adapter aux impacts du changement climatique dans la littérature scientifique et technique, les trous de connaissances associés à ces pistes sont également évoqués. S'adapter au changement climatique implique de connaître la vulnérabilité de son système face au climat futur, et les exploitants doivent pouvoir être accompagnés dans l'identification des faiblesses de leurs systèmes (CTIFL, 2022). La production de connaissances sur certains processus et certaines pratiques est nécessaire pour une adoption plus large par les producteurs : physiologie des espèces cultivées et itinéraires techniques, physiologie des bioagresseurs et des ennemis naturels en fonction de paramètre climatique, impacts de la réduction du travail du sol, performances de

¹⁰ Comme pour le tableur des impacts, le tableur recensant les pistes d'adaptation n'est pas éditable mais disponible sur demande à amelie.lefevre@inrae.fr

systèmes innovants avec des associations d'espèces ou de l'agroforesterie, etc.... (Morel & Cartau, 2023)

Certaines pratiques d'adaptation peuvent induire des inconvénients pour les systèmes : augmentation du temps de travail (lutte physique contre les ravageurs) (Morel & Cartau, 2023), nécessité d'une grande capacité d'investissement (équipements liés à l'eau) (Morel & Cartau, 2023), augmentation potentielle de la consommation énergétique (mise en place d'abris high-tech pour s'affranchir des conditions climatiques) (Bisbis et al., 2018). Enfin, la mise en réseau des acteurs de la filière maraîchage et l'intervention financière des puissances publiques est évoquée, pour financer la production de connaissances et sur des solutions adaptées au contexte de production et subventionner la mise en place de ces solutions chez les exploitants (Abewoy, 2018; Bisbis et al., 2018; Gruda et al., 2019).

4.2.3 Limites de la synthèse bibliographique

Comme pour la synthèse bibliographique des impacts du changement climatique, la synthèse des pistes d'adaptation ne peut être utilisée seule pour imaginer comment les systèmes maraîchers du Sud de la France vont pouvoir faire face à l'évolution du climat. Les pistes d'adaptation recensées restent génériques et peu opérantes pour réduire la vulnérabilité d'un système donné. Le recueil de ces pistes permet d'aiguiller la réflexion sur l'adaptation, mais elles doivent être transcrites à un cas précis pour évaluer leur pertinence.

De plus, la synthèse inclut uniquement des pistes d'adaptation mentionnées avec un objectif affiché d'adaptation au changement climatique. Or, certaines voies d'adaptation pouvant permettre de répondre aux enjeux posés par le changement climatique ne sont pas nécessairement identifiées comme telles. Par exemple, les pratiques actuelles de zones géographiques dont le climat est proche de celui attendu dans le Sud de la France peuvent servir d'inspiration pour l'adaptation des systèmes, sans être identifiées comme piste d'adaptation au changement climatique dans la littérature.

Pour imaginer des pistes d'adaptation plus opérantes, il est donc nécessaire de (1) fixer un système cas d'étude dont on veut réduire la vulnérabilité et (2) faire intervenir les connaissances d'experts de ce type de système pour concrétiser la forme que peuvent prendre les pistes d'adaptation, dans une approche exploratoire ouverte. C'est l'objet de la séquence « Réduire la vulnérabilité » de l'atelier du 12 juillet.

4.3 Démarche d'atelier : réduire les vulnérabilités d'un système cas d'étude

4.3.1 Matériel et méthodes

Les deux premiers temps de la démarche d'atelier (présentation des données climatiques et diagnostic de vulnérabilité) sont détaillés dans la partie 3 (ci-dessus). Ils permettent de partager une vision du climat futur possible sur la zone d'étude de l'atelier, et d'identifier les sources de vulnérabilité d'un système cas d'étude choisi en fonction de l'expertise des participants.

Le troisième temps vise à **réfléchir aux manières de s'affranchir de ces sources de vulnérabilité, et donc de rendre le système moins vulnérable.**

Le point de départ des échanges de cette phase est le diagnostic de vulnérabilité, et la note assignée au système lors de la phase précédente. Le visuel construit lors des échanges précédents est photographié et affiché pour mémoire dans la salle, et il est ensuite complété et modifié en fonction des éléments amenés par les participants.

La question de travail est également affichée : « **Quel système serait moins vulnérable en 2045 ?** »

Pour les relances, l'animateur dispose d'un recueil des pistes d'adaptation identifiées dans la synthèse bibliographique. Les relances sont faites également sur les trous de connaissances pour imaginer les pistes d'adaptation. A l'issue des échanges, d'une durée de 1h, les participants sont à nouveau interrogés sur la note de vulnérabilité du nouveau système, et sur les trous de connaissances à combler pour s'adapter au changement climatique.

4.3.2 Résultats de l'atelier-test du 12 juillet : réduire les vulnérabilités d'un système cas d'étude à Avignon

A partir des éléments de vulnérabilité définis lors du temps d'échanges précédent, les participants ont eu carte blanche pour imaginer un système qui serait moins vulnérable face au changement climatique.

4.3.2.1 Des options imaginées par le collectif et des pistes d'adaptation à combiner

Pour réduire la vulnérabilité, les participants ont proposé des pistes d'adaptation de types incrémentielle et systémique, avec une majorité d'adaptations plutôt systémiques. Quelques pistes transformantes ont été évoquées, ainsi que les trous de connaissances associés. L'angle choisi pour réduire la vulnérabilité a surtout consisté à améliorer la maîtrise des conditions climatiques sous l'abri en été, levier jugé stratégique pour faire baisser l'humidité et mieux maîtriser les ravageurs et pour diminuer la température.

L'ensemble des propositions évoquées par les participants sont reprises dans le tableau ci-dessous. La proposition de revoir la succession culturale a été la plus développée par les participants, le contenu des échanges sera donc détaillé par la suite.

Tableau 8 : Propositions des participants pour rendre le système moins vulnérable (en italique, interrogations ou doutes formulés par les participants)

Adaptations incrémentielles	Adaptations systémiques	Adaptations transformantes
<ul style="list-style-type: none"> • Gestion du climat par le blanchiment, l'aération, l'utilisation d'OAD • Améliorer les conditions climatiques sous abri par des modes de taille différents (conduite en buisson) ou en augmentant la densité de plantation (<i>risques sanitaires</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestion du climat par l'orientation des tunnels et leur environnement immédiat, par des méthodes d'ombrage alternatives (voiles d'ombrage amovibles, tunnels à enroulements latéraux) (<i>coût des méthodes</i>) • Evolution du type d'abri pour passer sur des abris filets (Espagne, Israël) (<i>cultures d'hiver impossibles</i>) • S'appuyer sur la complémentarité abri/plein champ • Revoir la succession culturale et la stratégie globale de l'entreprise en gardant la structure du tunnel plastique 	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration de nouvelles cultures : cacahuète, gingembre, curcuma (<i>souveraineté alimentaire et manque de connaissance</i>)

La majorité des échanges a consisté à **construire une nouvelle succession culturelle** sur la base de la succession initiale, en réduisant l'exposition estivale des cultures sensibles aux fortes chaleurs (tomate d'été remplacée par une tomate précoce, idem pour le melon) et en allongeant le cycle de culture de celles qui peuvent les tolérer (aubergine qui se termine deux mois plus tard). Ces propositions prises seules sont de nature incrémentielle, mais leur intégration au système suppose de faire varier l'intégralité de la succession, ce qui en fait des **adaptations systémiques**. En effet, pour pallier les décalages de cycles de cultures commerciales pour éviter l'été, des engrais verts ont été intégrés en juillet-août, et une forme de diversification des cultures d'été est aussi envisagée, avec une cucurbitacée tardive (concombre ou courgette) ajoutée en année 2 et la possibilité de remplacer l'aubergine par du poivron, moins sensible aux attaques de ravageurs.

Le temps des échanges n'a pas permis de finaliser la rotation proposée, et il subsiste des doutes, notamment sur la culture à positionner en hiver la deuxième année. Il est aussi notable que le système proposé, très centré sur l'été, a perdu en diversité en hiver avec un abandon de la blette. De plus, les participants ont identifié des **points de vigilance** à la mise en place de cette succession : risque de gel et de maladies accru et donc risque pour la qualité des produits en cultures d'été précoces et en plantation de fin d'été, incertitude sur la faisabilité de certains créneaux d'engrais vert (en été : manque d'eau) et sur les débouchés possibles pour les cultures repositionnés, risque de manque de diversité de production estivale si on se base uniquement sur les systèmes sous abri.

	1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Année n	Tomate (greffée)												Salade (1 seul tour)																																							
Année n+1	Melon								Engrais vert								Salade 1																																			
Année n+2	Salade 2				Aubergine																Blette																															
Année n+3																																																				

Figure 13 : Succession initiale « vulnérable »

	1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Année n	Tomate (précoce)												Engrais vert ou solarisation												Salade																											
Année n+1	Melon								Engrais vert								Courgette ou concombre																																			
Année n+2	quelle culture d'hiver ?												Aubergine ou poivron																																							
Année n+3	Engrais vert ou salade																																																			

Figure 14 : Succession construite pour réduire la vulnérabilité

4.3.2.2 Des connaissances manquantes identifiées

Les sources d'incertitude et trous de connaissances relevés par les participants portent à la fois sur le volet technique, mais aussi sur les aspects économiques. Du point de vue de la **faisabilité technique**, ils semblent confiants sur la capacité de la recherche à amener de nouvelles solutions technologiques plutôt incrémentielles (pour l'ombrage, pour les OAD, pour les nouveaux types d'abris), et insistent sur le besoin de produire des connaissances, notamment sur les paramètres climatiques qui impactent les bioagresseurs, les auxiliaires et les produits de protection des cultures. Il est aussi nécessaire de créer des références sur des variétés et des espèces d'interculture plus adaptées, et sur les modalités de mise en œuvre et l'efficacité de certaines techniques (solarisation tardive par exemple). L'incertitude liée à la survenue d'évènements extrêmes est également identifiée comme un élément bloquant pour imaginer les systèmes de demain, bien qu'elle semble militer en faveur du maintien d'une production sous abri pour s'en affranchir.

Sur le **volet économique**, les participants insistent sur la nécessité de dégager une capacité d'investissement pour s'adapter, qui est conditionnée par une bonne commercialisation et valorisation des produits, et donc des marchés qui s'adaptent aux nouvelles réalités de production. Cela passerait par une plus grande flexibilité des acheteurs sur les types de produits attendus et sur leur qualité (tolérance accrue aux défauts). Une vision optimiste a été évoquée, où les difficultés de productions

impactent de manière similaire toute l'Europe (notamment du Sud : Espagne, important fournisseur de légumes en France) et où les marchés sont tenus de revoir leurs exigences à la baisse et de s'adapter. L'hypothèse pessimiste est également soulevée : certaines zones plus au Nord que le Vaucluse pourraient être favorisées par le changement climatique, et les marchés délaisseraient les bassins de productions moins performants.

4.3.3 Points d'amélioration pour l'atelier « réduire la vulnérabilité »

Les échanges de l'atelier du 12 juillet ont permis une première réflexion sur les pistes d'adaptation pour réduire la vulnérabilité du système cas d'étude. Plusieurs pistes ont été évoquées par les participants, et les trous de connaissance associés ont pu être mis en discussion.

Cependant, la méthodologie d'atelier pour ce temps [3] peut être perfectionnée. D'une part, la manière d'animer la séquence est à approfondir : les échanges se sont bien déroulés mais il manquait des relances (ou du temps pour aller au bout de chaque proposition et cerner précisément l'objectif et les arguments associés à celle-ci). Le support de prise de note (modification en temps réel du support des échanges sur la vulnérabilité) était trop figé pour explorer des propositions impliquant une reconception de la succession. La construction d'une nouvelle succession par les participants n'avait pas nécessairement été anticipée, il faudrait prévoir de reprendre sur un support l'intégralité de la succession pour pouvoir identifier plus facilement les points bloquants (ex : culture d'hiver manquante). Pour autant, il est possible que cette phase exploratoire conduise les participants à reconcevoir par exemple un nouveau modèle d'abri et pas une succession. L'animation de cette séquence d'exploration doit être flexible et disposer de supports de prises de note souples. De plus, le temps nécessaire pour explorer un panel large d'options et de propositions est important, et 1h n'a pas suffi. Enfin, les moments de vulnérabilité étaient sans doute trop frais dans l'esprit des participants pour pouvoir prendre du recul. Ce point n'est pas une surprise mais le format de l'atelier avait dû être revu pour condenser en une demi-journée le partage des éléments de vulnérabilités et la phase d'exploration.

Lors de la conception de la démarche d'atelier, ce temps [3] devait avoir lieu lors d'une seconde date, à quelques semaines de celle sur le diagnostic de vulnérabilité. L'objectif était de laisser aux participants le temps de prendre du recul sur les échanges, et de réfléchir de leur côté aux éventuelles pistes pour réduire la vulnérabilité du système. Pour le test à Avignon, il n'a pas été possible de trouver deux dates à la période visée, et les deux ateliers ont donc été regroupés le même jour.

En théorie, il aurait fallu pouvoir disposer d'un délai entre les 2 séquences pour mieux préparer, alimenter et animer la séquence exploration sur la base du 1^{er} partage de connaissances.

L'organisation idéale serait de **découper l'atelier « Impacts du changement climatique sur mon système maraîcher et adaptation » en trois temps distincts :**

1. Webinaire de présentation des données tel que réalisé le 29 juin (format 1h30)
2. Un premier temps de 3h en présentiel avec un temps « le climat en 2045 » par exemple, le choix du cas d'étude et l'identification des vulnérabilités (si possible seulement quelques jours de délai après le webinaire). [Cette séquence pourrait aussi s'achever en repérant des pistes d'adaptation stratégiques à instruire plus en détail au prochain rdv]
3. Un second temps de 2-3h en présentiel quelques semaines plus tard pour revenir sur ces vulnérabilités, imaginer les pistes d'adaptations de manière plus complète et aller plus loin dans l'identification des trous de connaissances associés.

5 Suites de l'étude et pistes de travail

5.1 Démultiplier la démarche dans d'autres contextes

La démarche produite dans la présente étude a pu être mise à l'épreuve de deux collectifs : un groupe spécialisé en maraîchage sous abri le 6 avril, et un groupe spécialisé en maraîchage le 12 juillet, avec un cas d'étude sous abri. Pour éprouver la démarche et s'assurer de son opérabilité, il est donc nécessaire de la mettre à l'épreuve de systèmes par exemple de plein champ. La démarche, notamment via l'atelier multi-acteurs, permet de produire des connaissances sur les effets du changement climatique sur les systèmes maraîchers. **Mettre en œuvre cette démarche dans d'autres contextes de production (plein champ ou abri)** permettrait d'avoir une vision plus fine des vulnérabilités et des pistes d'adaptation à l'échelle du Sud de la France (d'autant que les complémentarités et associations entre outils de production sous abri et plein champ constituent une piste d'adaptation à l'échelle de l'exploitation).

Enfin, la démarche pourrait également être menée **sur un autre territoire** afin de déterminer si les connaissances produites sont pertinentes et utiles dans d'autres contextes géographiques. Les régions légumières et maraîchères de l'ouest de la France métropolitaine constitueraient de bons candidats, en raison du climat éloigné de celui du sud de la France et des contextes de production contrastés.

5.2 Approfondir les pistes d'adaptation

Pour réaliser la synthèse bibliographique, l'étude s'est focalisée sur les pistes d'adaptation identifiées comme telles, c'est-à-dire qui sont envisagées dans la publication avec l'objectif explicite de s'adapter au climat futur de la zone concernée. Or, les systèmes de production de zones dont le climat actuel est « proche » du climat futur du sud de la France peuvent déjà comporter des pistes d'adaptation. Recenser ces pratiques permettrait une synthèse plus complète des voies d'évolution possible pour les systèmes maraîchers du sud de la France.

Cependant, cette démarche suppose de choisir un angle sur lequel on souhaite synthétiser ou produire des connaissances. En effet, la diversité des systèmes de production maraîchère et des contextes géographiques implique une large gamme de sources pouvant répondre à la problématique de l'adaptation aux variations du climat. Le choix d'un type de production et d'un climat spécifique permettrait de cibler les publications d'intérêt. L'approfondissement de la synthèse des pistes d'adaptation peut donc être envisagée pour un contexte de production donné, et serait notamment utile pour alimenter les échanges lors de futurs ateliers en prenant l'angle du cas d'étude choisi.

5.3 Poursuivre la démarche dans une logique systémique

Au cours des phases de bibliographie, l'hypothèse de choisir des espèces-modèles pour lesquelles recenser les impacts attendus du changement climatique n'a pas été retenue, pour que l'étude produise des connaissances larges utiles aux systèmes maraîchers dans leur diversité. Les échanges en phase d'atelier ont permis de confirmer le caractère systémique des questions de vulnérabilité et d'adaptation au changement climatique : les participants ont identifié des sources de vulnérabilités liées à l'ensemble du système en plus de celles concernant une seule espèce ou pratique, et les pistes d'adaptation évoquées intègrent également cet aspect systémique.

Les suites à donner à l'étude doivent donc conserver cette combinaison d'échelle de travail, en envisageant les vulnérabilités et les pistes d'adaptations des espèces maraîchères, ainsi que des systèmes de production maraîchers. Les collectifs à réunir autour de cas d'étude dans de futurs ateliers devraient idéalement agréger une expertise généraliste des systèmes étudiés et une expertise plus ciblée sur des espèces ou des processus.

De plus, les outils de calcul d'indicateurs agroclimatiques ou écoclimatiques n'ont pas totalement trouvé leur place dans la démarche notamment du fait de la difficulté à se concentrer sur un petit nombre d'espèces modèle. Une piste pourrait être de travailler des modèles d'impacts (si disponibles), des calculs d'indicateurs aidant à évaluer la faisabilité climatique de cultures tout en les combinant à des approches plus exploratoires où les experts analysent les données climatiques et cernent eux-mêmes les risques pour les systèmes maraîchers. Il s'agirait d'organiser des allers-retours entre cette approche à l'échelle d'un système global identifiant ses vulnérabilités, cherchant des pistes d'adaptation et des phases plus fines mobilisant les modèles pour certaines cultures pivot dans le système de culture pour détailler les processus ou pratiques affectées.

6 Références bibliographiques

- Abewoy, D. (2018). Review on Impacts of Climate Change on Vegetable Production and its Management Practices. *Advances in Crop Science and Technology*, 06(01).
<https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000330>
- Agroclim, I. U. 1116. (s. d.). GETARI. Consulté 16 janvier 2023, à l'adresse
<https://agroclim.inrae.fr/getari/>
- Bio de PACA. (2020). *Les fermes maraîchères biologiques de Provence-Alpes-Côte d'Azur—Références techniques, économiques et sociales en maraîchage biologique. Perspective d'adaptation au changement climatique*. https://www.bio-provence.org/IMG/pdf/les_fermes_maraicheres_biologiques_de_paca.pdf
- Bisbis, M. B., Gruda, N., & Blanke, M. (2018). 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>
- CTIFL. (2020a, 2024). *Améliorer l'installation des punaises prédatrices en cultures maraîchères (ACOR)*. <https://www.ctifl.fr/ameliorer-l-installation-des-punaises-predatrices-en-cultures-maraicheres-acor-p000563>
- CTIFL. (2020b, janvier). Problématiques phytosanitaires—Rencontre technique aubergine-poivron-courgette. *Infos CTIFL*, 358. <https://www.ctifl.fr/problematiques-phytosanitaires-infos-ctifl-358>
- CTIFL. (2020c, avril). Comportement et répartition sur la culture de tomate—Mirides prédateurs *M. pygmaeus* et *N. tenuis*. *Infos CTIFL*, 360. <https://www.ctifl.fr/comportement-et-repartition-sur-la-culture-de-tomate-infos-ctifl-360>
- CTIFL. (2022, juin). Dérèglement climatique : Enjeux et perspectives pour la filière des fruits et légumes. *Infos CTIFL, Hors-série(12)*. <https://www.ctifl.fr/dereglement-climatique-enjeux-et-perspectives-pour-la-filiere-des-fruits-et-legumes-infos-ctifl-hs>
- De nouvelles normales pour qualifier le climat en France | Météo-France*. (s. d.). Consulté 8 août 2023, à l'adresse <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en-france>
- Donnée Sécheresse—Propluvia—Data.gouv.fr*. (s. d.). Consulté 9 août 2023, à l'adresse <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnee-secheresse-propluvia/>
- DRIAS. (s. d.-a). *DRIAS, Les futurs du climat—Accompagnement—Incertitude sur les variables rayonnement*. Consulté 9 août 2023, à l'adresse <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/308>
- DRIAS. (s. d.-b). *DRIAS, Les futurs du climat—Accompagnement—Recommandations*. Consulté 7 août 2023, à l'adresse <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/335>
- DRIAS. (s. d.-c). *DRIAS, Les futurs du climat—Accompagnement—Représentation des incertitudes*. Consulté 9 août 2023, à l'adresse <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/220>
- Eaufrance. (s. d.). *Repère > Arrêtés « sécheresse »*. Eaufrance. Consulté 8 août 2023, à l'adresse <https://www.eaufrance.fr/repere-arretes-secheresse>
- Gruda, N., Bisbis, M., & Tanny, J. (2019). Influence of climate change on protected cultivation : Impacts and sustainable adaptation strategies - A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 481-495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.210>
- Hoffmann, P., Menz, C., & Spekat, A. (2018). Bias adjustment for threshold-based climate indicators. *Advances in Science and Research*, 15, 107-116. <https://doi.org/10.5194/asr-15-107-2018>
- Hullé, M., Cœur d'Acier, A., Bankhead-Dronnet, S., & Harrington, R. (2010). Aphids in the face of global changes. *Comptes Rendus Biologies*, 333(6-7), 497-503.
<https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.03.005>

- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability : Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^{re} éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Lung, T., Dosio, A., Becker, W., Lavalle, C., & Bouwer, L. M. (2013). Assessing the influence of climate model uncertainty on EU-wide climate change impact indicators. *Climatic Change*, 120(1), 211-227. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0825-1>
- Météo France. (2022, août 30). *Changement climatique : L'été 2022 et ses extrêmes météorologiques pourraient être la norme après 2050 | Météo-France*. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/changement-climatique-lete-2022-et-ses-extremes-meteorologiques>
- Ministère de la Transition Ecologique. (2023). *Guide circulaire de mise en œuvre des mesures de restriction des usages de l'eau en période de sécheresse*. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20circulaire%20secheresse-conforme1605.pdf>
- Morel, K., & Cartau, K. (2023). Adaptation of organic vegetable farmers to climate change : An exploratory study in the Paris region. *Agricultural Systems*, 210, 103703. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103703>
- ORACLE Grand Est. (2020). *ORACLE 2020 : Etat des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en Grand Est*.
- Arrêté préfectoral n° DDTM/SER/2023/206-004 du 25 Juillet 2023, (2023).
- SADAPT UMR INRAE Agroparistech—CLIMALEG. (s. d.). Consulté 20 octobre 2022, à l'adresse <https://www6.versailles-grignon.inrae.fr/sadapt/Focus/CLIMALEG>
- Scheelbeek, P. F. D., Bird, F. A., Tuomisto, H. L., Green, R., Harris, F. B., Joy, E. J. M., Chalabi, Z., Allen, E., Haines, A., & Dangour, A. D. (2018). Effect of environmental changes on vegetable and legume yields and nutritional quality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(26), 6804-6809. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800442115>
- SIVAL (Réalisateur). (2023, janvier 17). *Adaptation au changement climatique pour le maraichage et l'arboriculture en agriculture biologique*. <https://online.sival-angers.com/event/sival-2023/planning/UGxhbm5pbmdfMTExNDM3NA==>
- Soubeyrou, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J.-P., Martin, É., & Dandin, P. (2012). Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, 8(78), 21. <https://doi.org/10.4267/2042/47512>
- Touili, N., Aubry, C., & Morel, K. (2023). *CLIMALEG : Adaptation des productions légumières au changement climatique. Rapport de synthèse [Report, INRAE]*. <https://hal.inrae.fr/hal-03986180>

7 Autres ressources

7.1 Définitions

Ci-après un recueil de définitions sur le thème (les sections soulignées correspondent à la reformulation spécifique aux systèmes agricoles maraîchers).

Terme <i>English</i>	Définition proposée (en vert la reformulation pour coller à l'objet de l'étude)	Source de la définition
Changement climatique <i>Climate change</i>	Variation dans l'état du climat qui peut être identifiée par des changements dans la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés, et qui persiste sur une période conséquente (décennies ou plus). Ces changements peuvent être dus à des processus internes ou externes au système climatique (ex : activité humaine). La convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique le définit comme celui résultant de l'activité humaine, par opposition à la variabilité du climat, qui est liée à des processus naturels (internes comme externes).	IPCC AR5, UNFCCC
Scénario d'émission <i>Emission scenario</i>	Représentation plausible de l'évolution future des émissions de substances radiativement actives (gaz à effet de serre, aérosol), basée sur des hypothèses sur les paramètres moteurs de ces émissions (développement démographique et socio-économique, utilisation des terres et de l'énergie, progrès technologique). Ils sont utilisés comme données d'entrées dans les modèles climatiques pour calculer des projections climatiques. Scénarios RCP (AR5) : définis selon le forçage radiatif induit par les émissions (4 scénarios)	IPCC AR5 et AR6
Modèle climatique <i>Climate model</i>	Représentation numérique du système climatique fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus d'interaction et de rétroaction, et qui tient compte d'une partie de ses propriétés connues.	
Projection climatique <i>Climate projection</i>	Réponse simulée du système climatique à différents scénarios d'émissions, généralement tirée de modèles climatiques.	IPCC AR5 et AR6
Scénario climatique <i>Climate scenario</i>	Correspond aux projections climatiques additionnées d'autres facteurs dont le climat actuel. Notion abandonnée dans le glossaire du sixième rapport	IPCC AR5
Aléa climatique <i>Hazard</i>	Potentielle survenue d'un événement climatique <u>qui peut avoir un impact négatif sur les systèmes maraîchers.</u>	IPCC AR5
Exposition <i>Exposure</i>	<u>Existence de systèmes maraîchers</u> dans des endroits et des contextes qui pourraient être négativement impactés. Ces endroits peuvent être définis de manière géographique ou de manière plus dynamique (interconnexions des marchés, flux de personnes).	IPCC AR5

Vulnérabilité <i>Vulnerability</i>	Propension à être impacté négativement (comprend des concepts comme la fragilité, l'incapacité de faire face et de s'adapter)	IPCC AR5
Incidence <i>Impact</i>	Effets des événements climatiques et du changement climatique <u>sur les systèmes maraîchers</u> . L'impact correspond aux effets sur ces systèmes compte tenu de leurs interactions avec le changement climatique ou les aléas climatiques au cours d'une période définie et de la vulnérabilité du système exposé.	IPCC AR5
Adaptation <i>Adaptation</i>	Démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu et à ses conséquences, dans le but de réduire ou d'éviter des effets négatifs ou d'exploiter de potentiels avantages. <ul style="list-style-type: none"> - Incrémentielle : adaptation dont le but est de maintenir l'intégrité d'un système ou processus - Transformante : adaptation qui modifie les attributs fondamentaux d'un système en réponse au climat ou à ses conséquences 	IPCC AR5
Risque <i>Risk</i>	Le potentiel de survenue de conséquences néfastes <u>sur les systèmes maraîchers</u> , en tenant compte de la diversité des valeurs et objectifs associés à ces systèmes. Les risques liés au changement climatique résultent de l'interaction entre des aléas climatiques et l'exposition et la vulnérabilité du système impacté.	IPCC AR5 et AR6
Indicateur	Indicateur climatique : indicateur permettant d'objectiver la perception d'un phénomène climatique, de quantifier un effet climatique Indicateur éco- ou agroclimatique : indicateur permettant de quantifier un effet climatique sur un processus physiologique ou une pratique culturale (GETARI)	GETARI + SICLIMA (INRAE Agroclim)

AR6 Climate Change 2022 - Impacts, adaptation and vulnerability - Technical Summary
AR5 Climate Change 2014 - Impacts, adaptation and vulnerability - Technical Summary

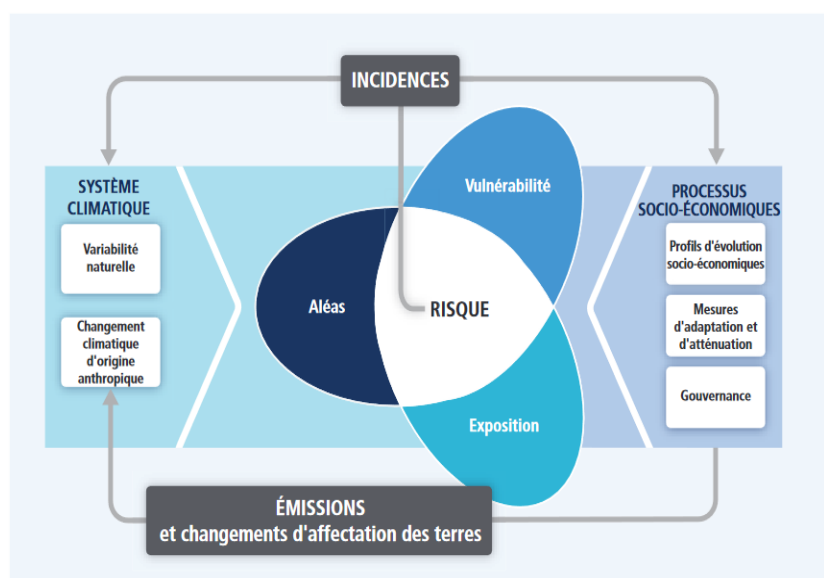
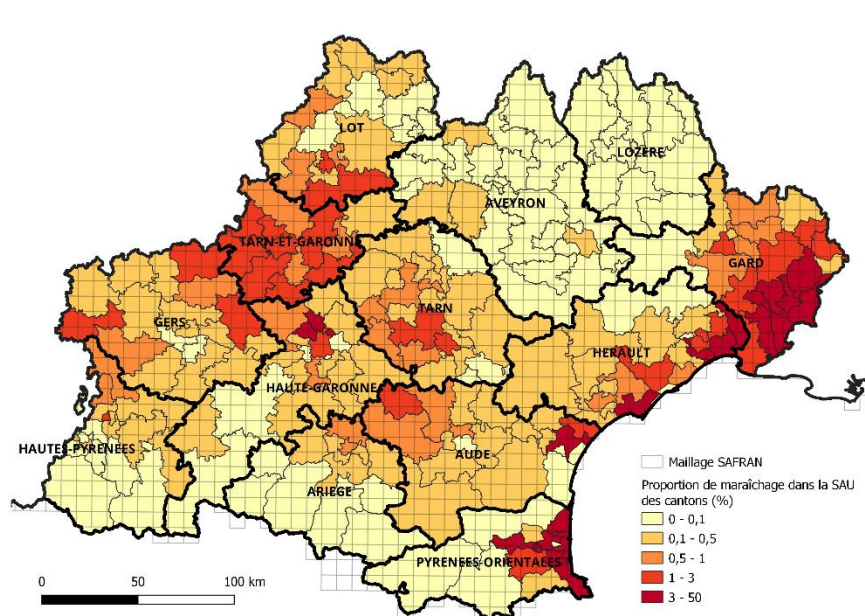


Figure RID.1 | Notions essentielles abordées dans la contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation (GTII RE5). Le risque d'incidences liées au climat découle de l'interaction entre des aléas climatiques (y compris les tendances et les phénomènes dangereux) et la vulnérabilité et l'exposition des systèmes anthropiques et naturels. Les changements qui touchent à la fois le système climatique (à gauche) et les processus socio-économiques, y compris l'adaptation et l'atténuation (à droite), sont les principales causes des aléas, de l'exposition et de la vulnérabilité. [19.2; figure 19-1]

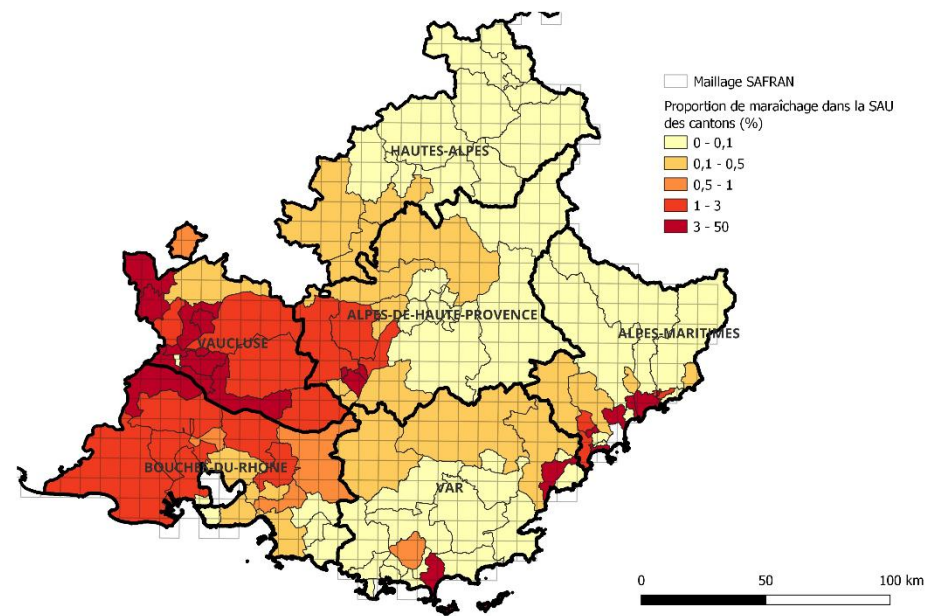
7.2 Cartographie des cantons maraîchers en Occitanie et PACA

Parmi les **Exploitations Légumières** (exploitations ayant déclaré cultiver des légumes frais), se distinguent trois modes de cultures : « Serres ou abris hauts », « Maraîchage » et « Plein champ ». **On considère ici système maraîcher** : Système de culture dont les parcelles (de plein air ou sous abris bas) sont toujours consacrées à des légumes au fil des campagnes. Le maraîchage se distingue des légumes de plein champ qui sont produits en rotation avec d'autres cultures (source : AGRESTE Les Dossiers N° 16 - JUIN 2013 http://sg-proxy02.maaf.ate.info/IMG/pdf/dossier16_definitions.pdf)



Cartographie des cantons d'Occitanie selon la proportion de maraîchage dans la SAU

Source des données: RPG 2021

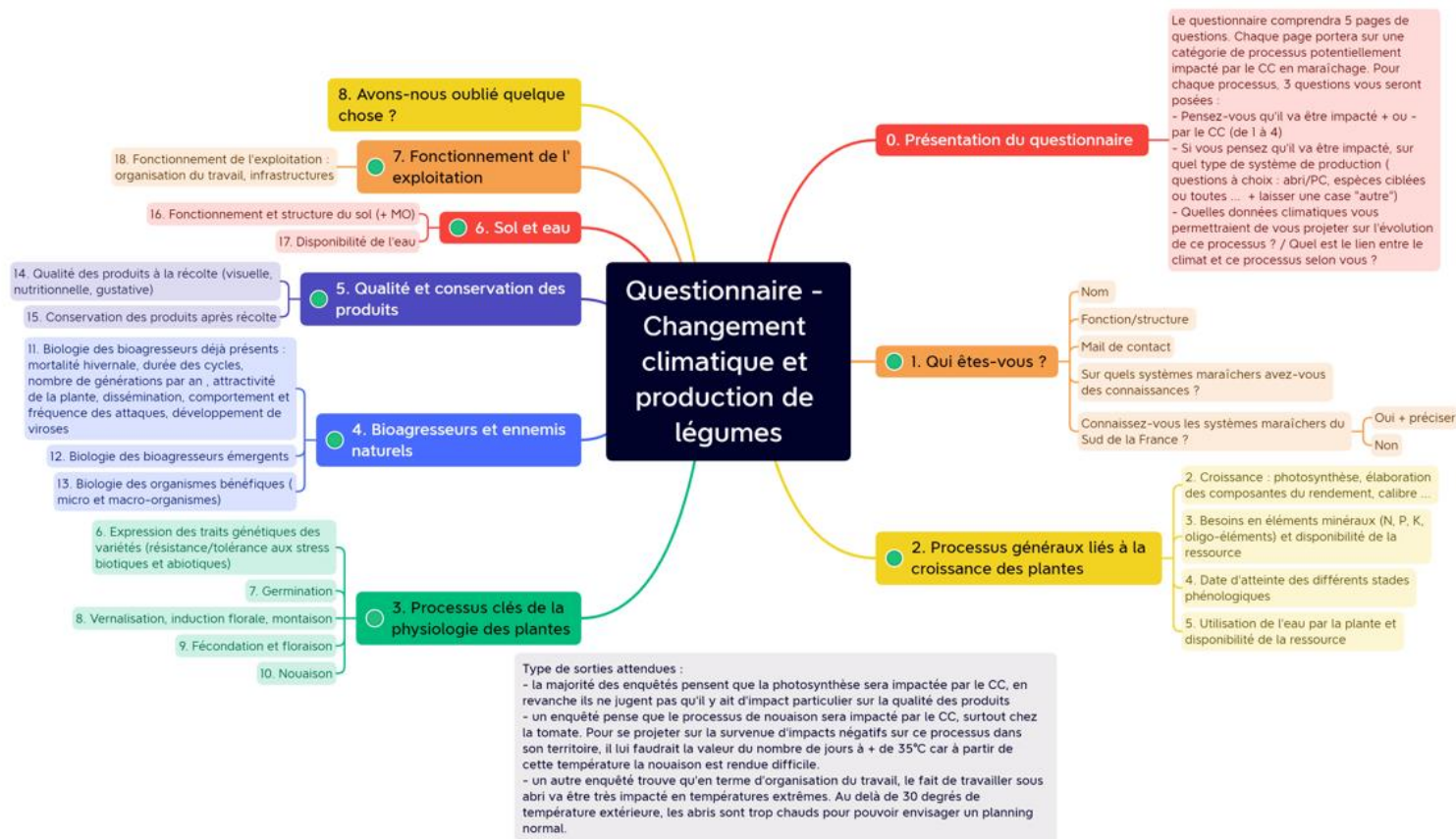


Cartographie des cantons de PACA selon la proportion de maraîchage dans la SAU

Source des données : RPG 2021

8 Annexes

8.1 ANNEXE 1 - Trame de l'enquête auprès des membres des GT du GIS PICléq pour le choix des indicateurs



Source des processus et pratiques : synthèse bibliographique

8.2 ANNEXE 2 - Guide pour la production d'un jeu de données de projection climatique sur une maille DRIAS-2020 à partir d'un script R

L'ensemble de cette annexe est disponible avec les fichiers à <https://doi.org/10.57745/IQMZDE>

8.2.1 Fichiers nécessaires ou à produire

Table csv	<i>Table_indicateurs_trame_mois.csv</i>	
Table csv	<i>siclma_Avignon.csv</i>	résultat de l'étape 1A à partir de l'outil SICLIMA ou 1B à partir de DRIAS pour la maille DRIAS où est Avignon
Table txt	<i>DRIAS_avignon_ref.txt</i> <i>DRIAS_avignon_proj.txt</i>	
Table txt	<i>DRIASEAU_ref_Avignon.txt</i> <i>DRIASEAU_proj_Avignon.txt</i>	
Table csv	<i>Heures_froid_avignon.csv</i>	résultat de l'étape 3 à partir d'un script R (nécessite d'avoir fait 1A pour la maille DRIAS où est Avignon)
Script R	<i>ProjectionClimat_indicateurs_légumes_V2.R</i>	
Script R	<i>Heures_froid.R</i>	
Feuille de calcul xlsx	<i>Bilans_mensuels.xlsx</i>	Pour la mise en forme du tableau de sortie
Table csv	<i>Bilan_mensuel_avignon.csv</i>	Produit par le script principal R

8.2.2 Introduction à l'utilisation du script principal

Le script 'ProjectionClimat_indicateurs_légumes_V2.R' se divise en 4 parties :

1. Chargement des données : chargement des différentes sources de données brutes utilisées pour les calculs et chargement de la trame à compléter (à partir de la ligne 10)
2. Création des variables intermédiaires : permet de créer les différentes variables utiles aux calculs, mais pas directement calculées par SICLIMA (ex : comptage de jours, etc) (à partir de la ligne 87)
3. Création des fonctions pour calculs : permet de construire des fonctions correspondant aux calculs à effectuer, qui pourront ensuite être appelées dans la boucle (à partir de la ligne 191)
4. Boucle pour remplir la trame et effectuer les calculs : permet d'indiquer comment remplir la trame (grain temporel des calculs + quel calcul effectuer pour quelle ligne) et pour sauvegarder le jeu de données en résultat (à partir de la ligne 599)

NB : Le script est adapté de celui conçu par Kévin Morel et Nabil Touili dans le cadre du projet CLIMALEG (le script et les trames de CLIMALEG sont disponibles [sur ce lien](#)). Les indicateurs étaient initialement calculés par saison. En souhaitant changer le grain temporel pour passer sur un calcul mensuel, le script a été modifié en séparant les formules de calcul et le remplissage de la trame. Cela permet de définir la manière de calculer chaque indicateur, puis de choisir à quel grain le calculer, plutôt que de faire tout d'un même bloc et de devoir modifier chaque bloc de calcul pour changer le grain temporel. Le script produit est ainsi plus flexible : pour obtenir le même jeu de données par saison, il suffit de créer une variable « Saison » dans la base de données SICLIMA et de modifier les premières lignes de la boucle.

8.2.3 Etapes préalables

- Ouvrir le script R principal nommé 'ProjectionClimat_indicateurs_légumes_V2.R' avec RStudio par exemple.
- Mettre dans le working directory le fichier correspondant à la **trame à remplir** (fichier *Table_indicateurs_trame_mois.csv*)
- **Téléchargement des données climatiques** pour les variables température, précipitations, ETP, vent, rayonnement : données DRIAS-2020 téléchargées via SICLIMA (procédure en 1A ci-après)
- **Téléchargement des données d'humidité des sols** : données CLIMSEC téléchargées via DRIAS-EAU (procédure en section 2 ci-après)
- **Création du fichier des heures de froid** : second script R à exécuter (procédure en section 3 ci-après)

1A. Guide pour télécharger des données DRIAS-2020 depuis SICLIMA

Pour exécuter la section 1A du script principal (pour les agents INRAE ou d'unité sous tutelle INRAE)

Objectif : extraire des données de projections climatiques pour 1 maille DRIAS via l'outil SICLIMA (Système d'information de données climatiques maillées) pour pouvoir produire un jeu de données climatiques via le script 'ProjectionClimat_indicateurs_légumes_V2.R'.

Outil utilisé : SICLIMA est une application web développée par l'unité Agroclim d'INRAE et à destination des agents INRAE. Elle permet d'accéder à des données climatiques maillées issues de deux bases : données SAFRAN (données météorologiques journalières historiques produites par Météo France) et DRIAS-2020 (données simulées de projections climatiques futures à partir de plusieurs modèles climatiques, produit du domaine public de Météo France). Pour l'étude, les données nécessaires sont les données DRIAS.

Etapes :

- Accéder à SICLIMA Extraction <https://agroclim.inrae.fr/siclimate/extraction/#HomePlace>: (identification via identifiant Idap INRAE)
- Création d'un projet d'extraction de données (Projet d'extraction de données > Création)
 - Identification du projet
 - Base climatique : DRIAS-2020 (version la plus récente)
 - Modèle climatique : au choix, **pour l'étude on a sélectionné CNRM – CM5/ALADIN63**
 - Scénario climatique : au choix, **pour l'étude on a sélectionné « Référence + RCP 4.5 » (scénario intermédiaire)**
 - Sélection des mailles : 2 options
 - Choisir sur la carte : permet de sélectionner la maille d'intérêt en cliquant directement sur la carte
 - Sélection par numéro de maille : permet d'indiquer le numéro de la maille d'intérêt, s'il est connu. On peut ensuite « Vérifier les mailles » (pour s'assurer que le numéro correspond à une maille existante) et « Visualiser la sélection sur la carte »
 - Sélection de la période d'extraction : permet de choisir le pas de temps de l'extraction. Pour faire tourner le script R, il faut choisir au minimum 1991-2060, mais il est possible d'extraire les données de 1951 à 2100.

- Sélection des variables climatiques : choisir « fichier CSV avec sélection des variables », puis cocher toutes les variables disponibles

Sélection des variables climatiques

Mode de sélection * fichiers pour le modèle STICS fichiers pour le modèle PMP fichiers pour le modèle Biljou fichier CSV avec sélection des variables

Vous trouverez ci-dessous la description, le code de la variable dans la base climatique et l'unité.
Cliquez pour sélectionner une variable climatique.
Glissez et déposez une variable sélectionnée pour ordonner la liste.
Notez que certaines variables sont nécessaires au calcul du bilan hydrique.

Variables climatiques pour calculer le bilan hydrique :

<input checked="" type="checkbox"/>	Concentration de CO2	co2 [ppm]
<input checked="" type="checkbox"/>	Evapotranspiration potentielle calculée par SICLIMA (formule de Penman-Monteith)	etppm [mm]
<input checked="" type="checkbox"/>	Humidité relative	hr [%]
<input checked="" type="checkbox"/>	Humidité spécifique à 2m	huss [prkg]
<input checked="" type="checkbox"/>	Précipitations neigeuse	prsn [mm]
<input checked="" type="checkbox"/>	Précipitations totales	prtda [mm]
<input checked="" type="checkbox"/>	Rayonnement infra-rouge incident à la surface	rlds [W/m²]
<input checked="" type="checkbox"/>	Température maximale journalière à 2m	tasmax [°C]
<input checked="" type="checkbox"/>	Rayonnement visible incident à la surface	rlds [W/m²]
<input checked="" type="checkbox"/>	Température minimale journalière à 2m	tasmin [°C]
<input checked="" type="checkbox"/>	Température moyenne journalière à 2m	tas [°C]
<input checked="" type="checkbox"/>	Vitesse du vent à 10m	stcwind [m/s]

- Cliquer sur « Aperçu avant enregistrement » en bas de page. Un récapitulatif de la saisie va s'afficher, s'il est correct la saisie peut être validée.

Aperçu avant validation de la saisie

Vous trouverez ci-dessous le récapitulatif des informations saisies dans le formulaire.

Nom du projet	lh
Description	-
Base climatique	DRIAS – 2020
Modèle climatique	CNRM-CM5 / ALADIN63
Scénario climatique	Reference + RCP4.5
Nombre de mailles	0
Mailles choisies	2219
Période	1951-2100
Variables climatiques	Concentration de CO2. Evapotranspiration potentielle calculée par SICLIMA (formule de Penman-Monteith) Humidité relative. Humidité spécifique à 2m. Précipitations neigeuse. Précipitations totales. Rayonnement infra-rouge incident à la surface. Température maximale journalière à 2m. Rayonnement visible incident à la surface. Température minimale journalière à 2m. Température moyenne journalière à 2m. Vitesse du vent à 10m.

- La page de gestion des projets d'extraction va s'ouvrir. En sélectionnant le projet nouvellement créé, on peut l'afficher, le modifier, le dupliquer ou le supprimer. Pour lancer la création du fichier, il faut choisir « Ne plus modifier » puis « Lancer la création de l'archive ».

N°	État du projet	Nom du projet	Base climatique	Modèle climatique	Scénario climatique	Période d'extraction	Nombre de mailles	Nombre de variables climatiques	Date de création	Date d'exécution	Avancement
1539	En cours de modification	lh	DRIAS – 2020	CNRM-CM5 / ALADIN63	Reference + RCP4.5	1951-2100	1	12	31 juil. 2023 à 10:13:00		

Numéro du projet 1539
Description -

- Une fois la création de l'archive lancée, un mail sera envoyé sur l'adresse INRAE de l'utilisateur pour l'avertir de la disponibilité des données. L'avancement de la requête peut être visualisé sur la page de gestion des projets d'extraction.
- Le fichier téléchargeable peut être chargé par le script R 'ProjectionClimat_indicateurs_légumes_V2.R' afin de générer le jeu de données de projections climatiques pour la zone choisie (nomenclature à respecter : **siclma_[nom du lieu].csv**)

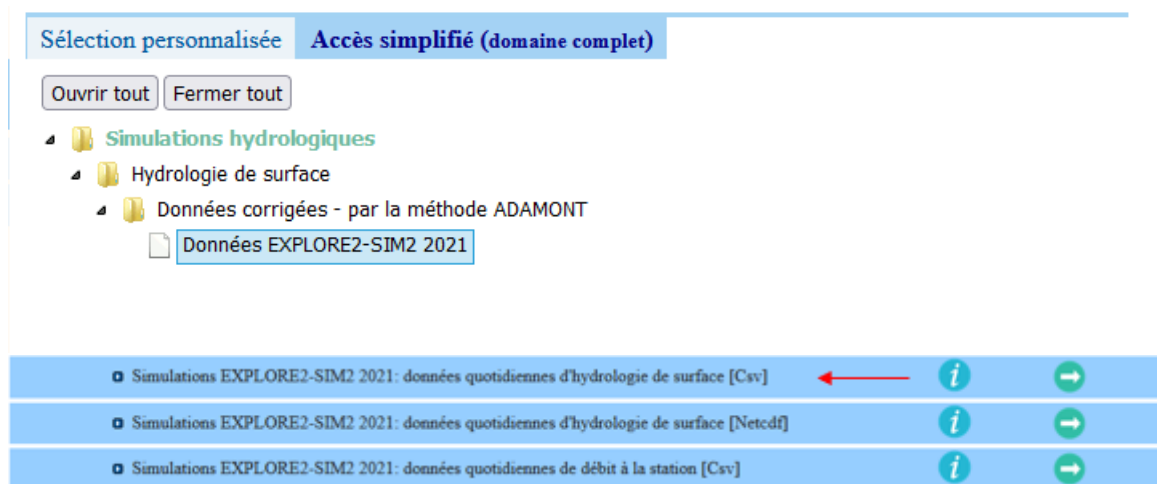
2 Télécharger des données CLIMSEC depuis DRIAS-EAU

Objectif : extraire des données de projection d'humidité des sols pour 1 maille DRIAS via le site DRIAS-EAU pour pouvoir compléter le jeu de données climatiques produit par le script *ProjectionClimat_indicateurs_légumes_V2.R*.

Outil utilisé : Le portail DRIAS – Les Futurs de l'Eau est une extension du portail DRIAS de Météo France, et a été lancé fin mars 2023. Il permet de télécharger des variables et indicateurs hydroclimatiques produits à partir de projections hydrologiques. La variable qui nous intéresse pour cette étude est le SWI (Soil Wetness Index) sous forme de données journalières, mais le script utilise le fichier de données par défaut de DRIAS-Eau qui contient toutes les variables.

Etapes :

- Accéder à DRIAS-Eau <https://www.drias-eau.fr> et créer un compte
- Dans l'onglet « Données et produits »
 - Se connecter à son compte
 - Choisir « Accès simplifié » puis « Données EXPLORE2-SIM2 2021 » puis « Données quotidiennes d'hydrologie de surface (csv) »



The screenshot shows the DRIAS-EAU interface with the following elements:

- Buttons: "Ouvrir tout" and "Fermer tout".
- Section: "Simulations hydrologiques" (expanded).
- Sub-section: "Hydrologie de surface" (expanded).
- Item: "Données corrigées - par la méthode ADAMONT" (expanded).
- Item: "Données EXPLORE2-SIM2 2021" (selected).
- List of data products:
 - Simulations EXPLORE2-SIM2 2021: données quotidiennes d'hydrologie de surface [Csv] (highlighted with a red arrow)
 - Simulations EXPLORE2-SIM2 2021: données quotidiennes d'hydrologie de surface [Netcdf]
 - Simulations EXPLORE2-SIM2 2021: données quotidiennes de débit à la station [Csv]

- Téléchargement des données pour les périodes de référence et de projection (**attention, les données de référence et de projection ne sont pas téléchargeables en même temps, il faut répéter la procédure**) :

- Référence :
 - Dans la liste des modèles et périodes, choisir « ALADIN63_CNRM-CM5 » et « Référence »

Expérience / Modèle hydro. ^A	Identifiant	Scénario d'émission	Période	GCM / RCM / BC	Producteur
EXPLORE2-SIM2 2021	ALADIN63_CNRM-CM5	Référence	1951-2005	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / CNRM-ALADIN63 / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	ALADIN63_CNRM-CM5	RCP2.6	2005-2100	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / CNRM-ALADIN63 / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	ALADIN63_CNRM-CM5	RCP4.5	2005-2100	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / CNRM-ALADIN63 / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	ALADIN63_CNRM-CM5	RCP8.5	2005-2100	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / CNRM-ALADIN63 / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	RACMO22E_CNRM-CM5	Référence	1950-2005	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / KNMI-RACMO22E / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	RACMO22E_CNRM-CM5	RCP2.6	2005-2100	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / KNMI-RACMO22E / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	RACMO22E_CNRM-CM5	RCP4.5	2005-2100	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / KNMI-RACMO22E / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	RACMO22E_CNRM-CM5	RCP8.5	2005-2100	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / KNMI-RACMO22E / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	WRF381P_IPSL-CM5A	Référence	1951-2005	IPSL-IPSL-CM5A-MR / IPSL-WRF381P / ADAMONT	Météo-France
EXPLORE2-SIM2 2021	WRF381P_IPSL-CM5A	RCP4.5	2005-2100	IPSL-IPSL-CM5A-MR / IPSL-WRF381P / ADAMONT	Météo-France

- Dans l'onglet « Référence temporelle », conserver les valeurs indiquées (1951-2005 et tous les mois sélectionnés)
- Dans l'onglet « Référence géographique », choisir la maille en cliquant sur la carte (on peut également indiquer directement un numéro de maille en cliquant sur « Autres possibilités de sélection des points de grille » sous la carte)

Autres possibilités de sélection des points de grille ...

1 Modifier directement la liste des numéros de points de grille :

 - Grille théorique de 143*134 points, numérotés de 0 à 19161 (origine en 41.4N / 4.1W, résolution 8 km).
- Seuls 8981 points terrestres ou côtiers sont utilisés.
- Le caractère ; est un séparateur de champ
- Le caractère - définit une plage de points de grille.

Appliquer Effacer

- Dans l'onglet « Paramètres météorologiques », cliquer sur « Tous » pour sélectionner tous les paramètres disponibles, puis vérifier les options de forme du fichier et valider la demande

■ Paramètres météorologiques

Sélection rapide des Paramètres

HYDROLOGIE DE SURFACE

ÉCOULEMENTS

AUCUN / Tous

Paramètres sélectionnés : 5

⚠ Les Paramètres sont fournis par défaut dans l'unité dans laquelle ils sont archivés

Hydrologie de surface ...

- Evapotranspiration réelle **mm** ⓘ [EVAPC]
- Humidité des sols (indice SWI) **sans unité** ⓘ [SWI]
- Équivalent en eau du manteau neigeux **mm** ⓘ [SWE]

Écoulements ...

- Drainage **mm** ⓘ [DRAINC]
- Ruissellement **mm** ⓘ [RUNOFFC]

■ Forme du fichier résultat

Choix du nombre de fichiers texte

Fourniture d'un seul fichier contenant l'ensemble des points sélectionnés

Fourniture d'un fichier par point de grille sélectionné

Format de ligne

DATE POSITION Paramètres

POSITION DATE Paramètres

- DATE: format de la date, à définir ci-dessous.
- POSITION: format de la position ou point de grille, à définir ci-dessous.
- Paramètres: valeurs de chacun des paramètres sélectionnés.

Format de POSITION des points de grille

Latitude Longitude

- IdPoint: numéro de point de grille.
- Latitude et longitude en degrés décimaux (système WGS84).
- LambertX et lambertY en hectomètres (système Lambert II étendu).
- Altitude en mètres.

Format de DATE

AAAA-MM-JJ (1 champ)

Séparateur de champs

Espace

- Un onglet « Mon panier » va s'afficher, cliquer sur « Confirmer la requête » puis « Accéder à la boîte de réception de vos requêtes ». Le fichier sera téléchargeable sur cette page lorsque la requête aura été exécutée.
 - Projection : **même procédure, en sélectionnant à la première étape « ALADIN63_CNRM-CM5 » et « RCP 4.5 »**. Pour aller plus vite, on peut dupliquer le formulaire de demande et modifier simplement la première étape (onglet « Mes requêtes » à gauche de l'interface > Mes formulaires de requête > Refaire une requête)
 - Nomenclature des fichiers à conserver pour appel par le script R : **DRIASEAU_ref_[nom du lieu].txt** et **DRIASEAU_proj_[nom du lieu].txt**

3. Créer le jeu de données des heures de froid

Objectif : à partir du fichier de données journalières issu de SICLIMA (section 1.a ci-dessus), reconstituer les températures horaires afin de pouvoir estimer le nombre d'heures de froid sur une période donnée.

Outil utilisé : Le package R « chillR » permet de reconstituer les températures horaires à partir des maximales et minimales journalières, en prenant en compte la durée du jour via la latitude. Source de la méthode : https://cran.r-project.org/web/packages/chillR/vignettes/hourly_temperatures.html

Etapes :

- Ouvrir le script R « Heures_froid.R »
- Si le package chillR n'est pas installé, taper la commande `install.packages("chillR")`
- Partie 1A : Vérifier le nom du fichier appelé en ligne 16 (chargement des données, nomenclature à respecter : ***siclma_[nom du lieu].csv***) (ou faire la partie 1B à partir de DRIAS et non SICLIMA et vérifier les noms en lignes 21 et 22)
- Vérifier le nom d'enregistrement du fichier final en ligne 51 (nomenclature à respecter : ***Heures_froid_[nom du lieu].csv***)
- Indiquer en ligne 47 **la latitude** du lieu pour lequel on souhaite générer le jeu de données (ex : latitude=43.90 pour Avignon ; latitude=42.63 pour Alénaya)
- Exécuter le script 'Heures_froid.R'

8.2.4 Guide de lecture du script 'ProjectionClimat indicateurs légumes V2.R'

Exemple pour le calcul du nombre de jours où la température dépasse 30°C

1. Chargement des données
2. Création de la variable intermédiaire « **day_of_months_sup_30** » (ligne 91) : pour chaque ligne du tableau de données source (ici SICLIMA), renvoie 1 si la maximale du jour dépasse 30 et renvoie 0 sinon.

```
### Jours à + de 30 °C ###
Base=cbind(Base, day_of_months_sup_30=0)
Base[Base$tasmax>=30,which(colnames(Base)=="day_of_months_sup_30")]=1
```

3. Création des formules pour **compter le nombre de jours à + de 30°C** l'année médiane et l'année extrême chaude (1 an sur 5) : la fonction `get_days_over_30`, appliquée sur une base de données à spécifier lors de l'appel de la fonction (argument `base_zoom=xx`), compte sur cette base de données les jours à + de 30°C grâce à la variable « **day_of_months_sup_30** » créée précédemment, en les regroupant par année et par période. Au sein de ce tableau intermédiaire à 60 lignes (une par année), elle renvoie deux valeurs : la médiane (15/30^{ème} année) pour la période 1991-2020 et la médiane pour la période 2031-2060. Le résultat affiché lors de l'appel de la fonction correspond donc à deux chiffres.

```
get_days_over_30 <- function(base_zoom){
  Res=aggregate(day_of_months_sup_30~year+Periode,data=base_zoom, sum)#pour sommer par facteur
  Un_sur_deux=as.vector(round(tapply(Res$day_of_months_sup_30, Res$Periode, median), digits=1))
  Un_sur_deux
}
```

Pour l'année extrême chaude, le raisonnement est le même sauf que la valeur renvoyée n'est pas la médiane mais la valeur aux 4/5^{ème} de la série de valeurs pour chaque période.

```
get_days_over_30_extreme <- function(base_zoom){
  Res=aggregate(day_of_months_sup_30~year+Periode,data=base_zoom, sum)#pour sommer par facteur
  Un_sur_cinq=as.vector(round(tapply(Res$day_of_months_sup_30, Res$Periode, function(x) quantile(x,probs=4/5)), digits=1))
  Un_sur_cinq
}
```

4. Boucle finale
 - Indiquer à quel grain temporel on veut faire le calcul. Par défaut, il se fait par mois (pour `i` allant de 1 à 12, on fait les calculs sur une base de données correspondant aux données SICLIMA pour lesquelles `mois=i` et on renvoie les résultats dans les colonnes `1+2i` (début en 3^{ème} colonne pour janvier) et `1+2i+1`

*

```
for (i in 1:12){ #Boucle pour faire les calculs mois après mois
  Base_zoom=Base[Base$month==i,]
  Base_sol_zoom=Base_sol[Base_sol$month==i,]
  Base_h_zoom=Base_h[Base_h$Month==i,]
  N_col = 1+(2*i)
  N_col2 = N_col+1
```

- Indiquer dans quelle ligne se trouve l'indicateur dans la trame csv à remplir et indiquer la fonction à utiliser pour le calcul (créée précédemment)

```
Table[5,N_col:N_col2] = get_days_over_30(base_zoom=Base_zoom)
```

Et pour une autre maille ?

Si on souhaite produire un jeu de données pour une autre maille DRIAS, il suffit de suivre à nouveau les différentes étapes de la section « Etapes préalables » en prenant soin de conserver la nomenclature des fichiers et de simplement changer le nom du lieu (ex : Heures_froid_alenya.csv).

Puis, dans le script R, il faut :

- Rechercher/remplacer le nom de l'ancienne maille par la nouvelle : cela changera les noms des fichiers appelés et des fichiers enregistrés (5 changements).

```
Base<-read.csv2("siclima_avignon.csv", h=T, dec=".")  
Base_sol_ref<-read.table("DRIASEAU_avignon_ref.txt", h=F, sep = " ", dec=".")  
Base_sol_proj<-read.table("DRIASEAU_avignon_proj.txt", h=F, sep = " ", dec=".")  
Base_h<-read.csv2("Heures_froid_avignon.csv", h=T)  
write.csv2(Table, file="Bilan_mensuel_avignon.csv", row.names = FALSE)
```

Seuil de canicule

Si on souhaite calculer cet indicateur, changer les seuils à prendre en compte pour les canicules (ligne Création variables > Jours de canicule). Les seuils Météo France sont accessibles sur [ce lien](#).

Création d'une variable "Saison" dans les 3 bases de données utilisées

```
##création d'une variable "Saison" dans les 3 bases de données utilisées

#Base SICLIMA
Base=cbind(Base,Saison="0")
Base$Saison[Base$month=="12" | Base$month=="1" | Base$month=="2"]<-
"1"
Base$Saison[Base$month=="3" | Base$month=="4" | Base$month=="5"]<-
"2"
Base$Saison[Base$month=="6" | Base$month=="7" | Base$month=="8"]<-
"3"
Base$Saison[Base$month=="9" | Base$month=="10" | Base$month=="11"]<-
"4"

#Base sol
Base_sol=cbind(Base_sol,Saison="0")
Base_sol$Saison[Base_sol$month=="12" | Base_sol$month=="1"
| Base_sol$month=="2"]<-"1"
Base_sol$Saison[Base_sol$month=="3" | Base_sol$month=="4"
| Base_sol$month=="5"]<-"2"
Base_sol$Saison[Base_sol$month=="6" | Base_sol$month=="7"
| Base_sol$month=="8"]<-"3"
Base_sol$Saison[Base_sol$month=="9" | Base_sol$month=="10"
| Base_sol$month=="11"]<-"4"

#Base températures horaires
Base_h=cbind(Base_h,Saison="0")
Base_h$Saison[Base_h$Month=="12" | Base_h$Month=="1"
| Base_h$Month=="2"]<-"1"
Base_h$Saison[Base_h$Month=="3" | Base_h$Month=="4"
| Base_h$Month=="5"]<-"2"
Base_h$Saison[Base_h$Month=="6" | Base_h$Month=="7"
| Base_h$Month=="8"]<-"3"
Base_h$Saison[Base_h$Month=="9" | Base_h$Month=="10"
| Base_h$Month=="11"]<-"4"

##En-tête de la boucle pour les calculs par saison
for (i in 1:4){ #Boucle pour faire les calculs saison après
saison
  Base_zoom=Base[Base$Saison==i,]
  Base_sol_zoom=Base_sol[Base_sol$Saison==i,]
  Base_h_zoom=Base_h[Base_h$Saison==i,]
  N_col = 1+(2*i)
  N_col2 = N_col+1
}
```

8.2.5 Mise en page du jeu de données issu de R sous Excel (version MO)

Un fichier csv a été généré par le script R principal → « Bilan_mensuel_Avignon.csv »

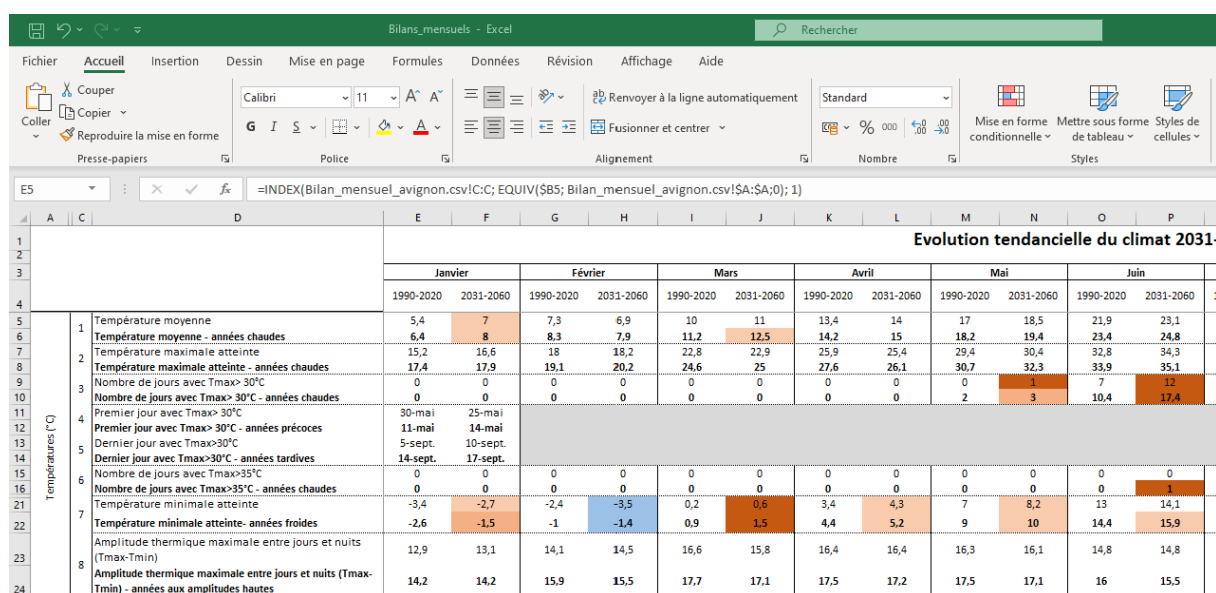
L'autre fichier Excel mis en page est à récupérer "Bilans_mensuels.xlsx ».

Ouvrir Excel

Ouvrir sous Excel deux fichiers : l'un est prévu pour accueillir les données avec une mise en page adaptée ("Bilans_mensuels") et il inclut les formules INDEX/EQUIV pour aller chercher les données produites et présentes dans le fichier qu'on vient de générer par R « Bilan_mensuel_Avignon.csv »).

Le fichier « Bilans_mensuels » permet de mettre en page la trame csv complétée pour la rendre plus visuelle.

Le remplissage se fait automatiquement grâce à la colonne « Code » de la trame issue de R, qui associe à chaque indicateur un code, qui est également repris dans la colonne B (masquée par défaut) du fichier Bilans_mensuels. Le fichier est automatisé : en ouvrant « Bilans_mensuels », si on ouvre en parallèle le fichier csv issu de R, la mise à jour des champs se fait automatiquement (utilisation des fonctions INDEX et EQUIV qui vont localiser pour chaque case la valeur de l'indicateur dans la trame issue de R).



		Evolution tendancielle du climat 2031-											
		Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin	
		1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060
Températures (°C)	1	Température moyenne											
	2	5,4	7	7,3	6,9	10	11	13,4	14	17	18,5	21,9	23,1
	3	Température moyenne - années chaudes											
	4	6,4	8	8,3	7,9	11,2	12,5	14,2	15	18,2	19,4	23,4	24,8
	5	Température maximale atteinte											
	6	15,2	16,6	18	18,2	22,8	22,9	25,9	25,4	29,4	30,4	32,8	34,3
	7	Température maximale atteinte - années chaudes											
	8	17,4	17,9	19,1	20,2	24,6	25	27,6	26,1	30,7	32,3	33,9	35,1
	9	Nombre de jours avec Tmax>30°C											
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	12
	11	Nombre de jours avec Tmax>30°C - années chaudes											
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	10,4	17,4
	13	Premier jour avec Tmax>30°C											
	14	30-mai	25-mai										
15	Premier jour avec Tmax>30°C - années précoces												
16	11-mai	14-mai											
17	Dernier jour avec Tmax>30°C												
18	5-sept.	10-sept.											
19	Dernier jour avec Tmax>30°C - années tardives												
20	14-sept.	17-sept.											
21	Nombre de jours avec Tmax>35°C												
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	Nombre de jours avec Tmax>35°C - années chaudes												
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
25	Température minimale atteinte												
26	-3,4	-2,7	-2,4	-3,5	0,2	0,6	3,4	4,3	7	8,2	13	14,1	
27	Température minimale atteinte - années froides												
28	-2,6	-1,5	-1	-1,4	0,9	1,5	4,4	5,2	9	10	14,4	15,9	
29	Amplitude thermique maximale entre jours et nuits (Tmax-Tmin)												
30	12,9	13,1	14,1	14,5	16,6	15,8	16,4	16,4	16,3	16,1	14,8	14,8	
31	Amplitude thermique maximale entre jours et nuits (Tmax-Tmin) - années aux amplitudes hautes												
32	14,2	14,2	15,9	15,5	17,7	17,1	17,5	17,2	17,5	17,1	16	15,5	

Comment identifier les impacts du changement climatique et les pistes d'adaptation ?
Outils opérationnels et 1^{ers} résultats appliqués aux systèmes maraîchers du sud de la France



Mise à jour des liaisons entre fichiers

Si le lien ne se fait pas automatiquement à l'ouverture des 2 fichiers, il faut mettre à jour les liaisons.

Ouvrir Excel et y ouvrir « Bilan_mensuel_Avignon.csv » puis ouvrir Bilan_mensuel.xlsx

Qui s'ouvre et demande une mise à jour des liaisons → clique sur « Mettre à jour »

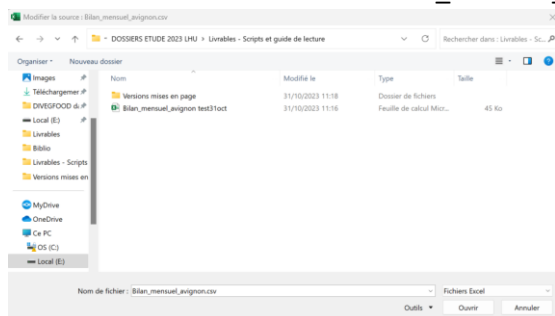
Puis cliquer sur « Modifier les liaisons »

Puis « Modifier la source »

Evolution tendancielle du climat 2031-2060 - Avignon (

	Février		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet	
60	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060
3		2,8									2	1,8
5		4									4	4
6,2		7									5	5
15,5		13,2									10,1	6,6
40,2		40,4									22,8	25,3
61,2		62,7									50,1	56,9
21,6		21									12,8	14,4
35,8		45,9									33,2	41,5
-43,5		-48,5									-225,9	-247,3
-17,4		-18,4									-186,8	-214,6
13,4		7,8									-152,4	-173,7
58,3		58,9									210,7	238,5
64		63									236	261,3
67,6		66,8									56,4	53,9
71,2		69,7									60,1	58,5

Et saisir le lien vers le fichier « Bilan_mensuel_Avignon.csv » ou son nom complet.csv



Cliquer sur **Ouvrir**

Patience, la mise à jour case par case peut prendre un peu de temps

Quand le tableau est à nouveau complété et en couleur, « Fermer » la fenêtre de modification des liaisons

Février		Mars		Avril		Mai		Juin		
1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020
3	2,8									2
5	4									4
6,2	7									5
15,5	13,2									10,1
40,2	40,4									22,8
61,2	62,7									50,1
21,6	21									12,8
35,8	45,9									33,2
-43,5	-48,5									-225,9
-17,4	-18,4									-186,8
13,4	7,8									-152,4
58,3	58,9									210,7
64	63									236
67,6	66,8									56,4
71,2	69,7									60,1
0,57	0,48	0,57	0,51	0,5	0,46	0,42	0,36	0,31	0,27	0,23
0,71	0,69	0,65	0,65	0,58	0,6	0,48	0,47	0,37	0,31	0,26
0,76	0,79	0,8	0,73	0,7	0,67	0,56	0,6	0,46	0,46	0,37

Deux onglets sont construits l'un avec toutes les data et l'autre où l'année médiane et l'année extrême sont séparées.

Pour préserver l'intégrité de « Bilan_mensuel.xlsx », il est préférable d'enregistrer une copie.

Cette méthode permet d'éviter les copier-coller hasardeux, et permet également plus de flexibilité : si on veut modifier l'ordre des lignes pour la mise en page, cela n'affecte pas la lecture du moment que le bon code est associé au bon indicateur. Par sécurité, **si l'ordre est modifié, il est tout de même plus prudent de vérifier la formule de la première case (voir plus bas)** et de l'étendre à toute la première ligne, puis d'étendre cette ligne au reste du tableau.

Nomenclature de la fonction :

=INDEX(**tableau**; EQUIV(**valeur_recherchée**; **plage_de_recherche**; **type**); **no_colonne**)

=INDEX('C:\Users\JOKER\Documents\R\[Bilan_mensuel_avignon.csv]Bilan_mensuel_avignon'!C:C;
EQUIV(\$B5;

'C:\Users\JOKER\Documents\R\[Bilan_mensuel_avignon.csv]Bilan_mensuel_avignon'!\$A:\$A;0); 1)

Argument	Description
tableau	Correspond à la colonne de la trame issue de R dont on souhaite afficher la valeur (<i>attention à NE PAS figer par des \$ pour changer de colonne quand on étire la formule</i>)
valeur_recherchée	Correspond à la case qui indique le code pour la liaison dans le fichier mis en page (<i>dans la première case, attention à bien figer la colonne par un \$, mais pas la ligne, afin de pouvoir étendre plus facilement la formule</i>)
plage_de_recherche	Correspond à la colonne où chercher le code pour la liaison dans la trame issue de R (<i>attention à bien figer par des \$ pour conserver la même colonne de recherche en étirant la formule</i>)
type	Spécifie le type de correspondance, veiller à laisser sur 0 (correspondance exacte) pour ne pas risquer que la formule renvoie une autre valeur.
no_colonne	Correspond à la colonne à renvoyer dans la plage de l'argument « tableau » (il n'y a qu'une colonne, donc on peut laisser 1)

Et pour une autre maille ?

Si on souhaite afficher la version mise en page pour une autre maille DRIAS, il suffit de dupliquer l'onglet Excel et de spécifier le bon nom du fichier source (format Bilan_mensuel_ville.csv) dans la première case, puis d'étirer à nouveau la formule (en s'assurant toujours d'ouvrir le fichier csv en parallèle pour que la liaison puisse se faire).



8.2.6 Dictionnaire des indicateurs et variables associées

Indicateurs utilisés dans l'étude 2023 GIS PICLEG

*les premiers et derniers jours d'une année s'entendent entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre

Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
1	Température moyenne	Médiane sur 30 ans de la température moyenne (par mois ou par saison)	TM	Tas	NA	get_avg_temp
	Température moyenne - années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la température moyenne (par mois ou par saison)	TMX	Tas	NA	get_avg_temp_extreme
2	Température maximale atteinte	Médiane sur 30 ans de la température maximale atteinte (par mois ou par saison)	TMAX	Tasmax	NA	get_max_temp
	Température maximale atteinte - années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la température maximale atteinte (par mois ou par saison)	TMAXX	Tasmax	NA	get_max_temp_extreme
3	Nombre de jours avec Tmax > 30°C	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où la température maximale dépasse 30°C (par mois ou par saison)	NB30	Tasmax	day_of_months_sup_30	get_days_over_30
	Nombre de jours avec Tmax > 30°C - années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où la température maximale dépasse 30°C (par mois ou par saison)	NB30X	Tasmax	day_of_months_sup_30	get_days_over_30_extreme



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
4	Premier jour avec Tmax>30°C	Médiane sur 30 ans du premier jour de l'année* où la température maximale dépasse 30°C	PJ30	Tasmax	day_of_months_sup_30	get_first_day_over_30
	Premier jour avec Tmax>30°C - années précoces	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans du premier jour de l'année* où la température maximale dépasse 30°C	PJ30X	Tasmax	day_of_months_sup_30	get_first_day_over_30_extreme
5	Dernier jour avec Tmax>30°C	Médiane sur 30 ans du dernier jour de l'année* où la température maximale dépasse 30°C	DJ30	Tasmax	day_of_months_sup_30	get_last_day_over_30
	Dernier jour avec Tmax>30°C - années tardives	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans du dernier jour de l'année* où la température maximale dépasse 30°C	DJ30X	Tasmax	day_of_months_sup_30	get_last_day_over_30_extreme
6	Nombre de jours avec Tmax>35°C	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où la température maximale dépasse 35°C (par mois ou par saison)	NB35	Tasmax	day_of_months_sup_35	get_days_over_35
	Nombre de jours avec Tmax>35°C - années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où la température maximale dépasse 35°C (par mois ou par saison)	NB35X	Tasmax	day_of_months_sup_35	get_days_over_35_extreme



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
7	Température minimale atteinte	Médiane sur 30 ans de la température minimale atteinte (par mois ou par saison)	TMIN	Tasmin	NA	get_min_temp
	Température minimale atteinte- années froides	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la température minimale atteinte (par mois ou par saison)	TMINX	Tasmin	NA	get_min_temp_extreme
8	Amplitude thermique maximale entre jours et nuits (Tmax-Tmin)	Médiane sur 30 ans de la plus grande différence entre les températures maximales et maximales journalières (par mois ou par saison)	AMPMAX	Tasmax Tasmin	Diff_temperature	get_temp_delta
	Amplitude thermique maximale entre jours et nuits (Tmax-Tmin) - années aux amplitudes hautes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la plus grande différence entre les températures maximales et maximales journalières (par mois ou par saison)	AMPMAXX	Tasmax Tasmin	Diff_temperature	get_temp_delta_extreme
9	Nombre de jours avec risque de gel (Tmin<0°C)	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où la température minimale est inférieure à 0°C (par mois ou par saison)	NBG1	Tasmin	day_of_month_gel_0	get_frost_days



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
	Nombre de jours avec risque de gel (Tmin<0°C) - années froides	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où la température minimale est inférieure à 0°C (par mois ou par saison)	NBG1X	Tasmin	day_of_month_gel_0	get_frost_days_extreme
10	Nombre de jours avec risque de gel (Tmin<-2°C)	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où la température minimale est inférieure à -2°C (par mois ou par saison)	NBG2	Tasmin	day_of_month_gel_2	get_severe_frost_days
	Nombre de jours avec risque de gel (Tmin<-2°C) - années froides	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où la température minimale est inférieure à -2°C (par mois ou par saison)	NBG2X	Tasmin	day_of_month_gel_2	get_severe_frost_days_extreme
11	Premier jour de risque de gel (Tmin<0°C)	Médiane sur 30 ans du premier jour de l'année* où la température minimale est inférieure à 0°C	PJG	Tasmin	day_of_month_gel_0	get_first_frost_day
	Décalage du premier jour de risque de gel par rapport à 1991-2020 (en jours)	Différence entre le premier jour de gel (médiane) pour 2031-2060 et pour 1991-2020	DPJG	Tasmin	day_of_month_gel_0	NA
	Premier jour de risque de gel (Tmin<0°C) -	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans du premier jour de l'année* où la	PJGX	Tasmin	day_of_month_gel_0	get_first_frost_day_extreme



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
	années précoces	température minimale est inférieure à 0°C				
	Décalage du premier jour de risque de gel par rapport à 1991-2020 - années précoces	Différence entre le premier jour de gel (1/5 ^{ème}) pour 2031-2060 et pour 1991-2020	DPJGX	Tasmin	day_of_month_gel_0	NA
12	Dernier jour de risque de gel (Tmin<0°C)	Médiane sur 30 ans du dernier jour de l'année* où la température minimale est inférieure à 0°C	DJG	Tasmin	day_of_month_gel_0	get_last_frost_day
	Décalage du dernier jour de risque de gel par rapport à 1991-2020 (en jours)	Différence entre le dernier jour de gel (médiane) pour 2031-2060 et pour 1991-2020	DDJG	Tasmin	day_of_month_gel_0	NA
	Dernier jour de risque de gel (Tmin<0°C) - années tardives	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans du dernier jour de l'année* où la température minimale est inférieure à 0°C	DJGX	Tasmin	day_of_month_gel_0	get_last_frost_day_extreme
	Décalage du dernier jour de risque de gel par rapport à	Différence entre le dernier jour de gel (4/5 ^{ème}) pour 2031-2060 et pour 1991-2020	DDJGX	Tasmin	day_of_month_gel_0	NA



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
	1991-2020 - années tardives					
13	Nombre de jours de pluie (> 1 mm) - années sèches	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où les précipitations sont supérieures à 1 mm (par mois ou par saison)	NBPXS	Prtot	Jours_pluie	get_rain_days_dry_extreme
	Nombre de jours de pluie (> 1 mm) - année normale	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où les précipitations sont supérieures à 1 mm (par mois ou par saison)	NBP	Prtot	Jours_pluie	get_rain_days
	Nombre de jours de pluie (> 1 mm) - années humides	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où les précipitations sont supérieures à 1 mm (par mois ou par saison)	NBPXH	Prtot	Jours_pluie	get_rain_days_wet_extreme
14	Cumul de précipitations - années sèches	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des précipitations journalières (par mois ou par saison)	CUMPXS	Prtot	NA	get_accumulated_rain_dry_extreme
	Cumul de précipitations - année normale	Médiane sur 30 ans de la somme des précipitations journalières (par mois ou par saison)	CUMP	Prtot	NA	get_accumulated_rain



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
	Cumul de précipitations - années humides	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des précipitations journalières (par mois ou par saison)	CUMPXH	Prtot	NA	get_accumulated_rain_wet_extreme
15	Max de cumul de précipitations en 3 jours	Médiane sur 30 ans de la plus grande somme des précipitations sur 3 jours consécutifs (par mois ou par saison)	MAXCUM	Prtot	Cumul_3_jours	get_max_rain_3_days
	Max de cumul de précipitations en 3 jours - années humides	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la plus grande somme des précipitations sur 3 jours consécutifs (par mois ou par saison)	MAXCUMX	Prtot	Cumul_3_jours	get_max_rain_3_days_extreme
16	P - ETP - années sèches	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la différence cumulée entre les précipitations et l'ETP journaliers (par mois ou par saison)	PETPXS	Prtot Etpm	Diff_P_etppm	get_rain_deficit_dry_extreme
	P - ETP - année normale	Médiane sur 30 ans de la différence cumulée entre les précipitations et l'ETP journaliers (par mois ou par saison)	PETP	Prtot Etpm	Diff_P_etppm	get_rain_deficit
	P - ETP - années humides	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la différence cumulée entre les précipitations et	PETPXH	Prtot Etpm	Diff_P_etppm	get_rain_deficit_wet_extreme



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
		l'ETP journaliers (par mois ou par saison)				
17	Cumul mensuel de l'ETP	Médiane sur 30 ans du cumul des ETP journaliers (par mois ou par saison)	ETP	Etpm	NA	get_accumulated_etp
	Cumul mensuel de l'ETP - années hautes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans du cumul des ETP journaliers (par mois ou par saison)	ETPX	Etpm	NA	get_accumulated_etp_extreme
18	Humidité moyenne de la journée	Médiane sur 30 ans de la moyenne des humidités journalières (par mois ou par saison)	HUM	Hr	NA	get_mean_humidity
	Humidité moyenne de la journée - années humides	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la moyenne des humidités journalières (par mois ou par saison)	HUMX	Hr	NA	get_mean_humidity_extreme
19	Indice d'humidité des sol (SWI) moyen - années sèches	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la moyenne des SWI journaliers (par mois ou par saison)	SWIXS	SWI	NA	get_mean_swi_dry_extreme
	³ Indice d'humidité des sol (SWI) moyen - année normale	Médiane sur 30 ans de la moyenne des SWI journaliers (par mois ou par saison)	SWI	SWI	NA	get_mean_swi
	Indice d'humidité des sol (SWI) moyen	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la moyenne des SWI	SWIXH	SWI	NA	get_mean_swi_wet_extreme



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
	- années humides	journaliers (par mois ou par saison)				
20	Nombre de jours sol sec (SWI<0,4)	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où le SWI est inférieur à 0,4 (par mois ou par saison)	NBSEC	SWI	Jours_sol_sec	get_dry_soil_days
	Nombre de jours sol sec (SWI<0,4) - années sèches	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où le SWI est inférieur à 0,4 (par mois ou par saison)	NBSECX	SWI	Jours_sol_sec	get_dry_soil_days_extreme
21	Nombre de jours avec humidité relative>80%	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où l'humidité relative dépasse 80% (par mois ou par saison)	NBH80	Hr	Jours_humides	get_wet_days
	Nombre de jours avec humidité relative>80% - années humides	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où l'humidité relative dépasse 80% (par mois ou par saison)	NBH80X	Hr	Jours_humides	get_wet_days_extreme
22	Date du premier jour avec Tmin>12°C (risque de vol puceron)	Médiane sur 30 ans du premier jour de l'année* où la température minimale est supérieure à 12°C	PJ12	Tasmin	day_of_month_12	get_first_day_above_12
	Date du premier jour avec	1/5 ^{ème} valeur sur 30 ans du premier jour de	PJ12X	Tasmin	day_of_month_12	get_first_day_above_12_extreme



Numéro	Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans le script principal R	Formules des fonctions R associées
	Tmin>12°C (risque de vol puceron) - années précoces	l'année* où la température minimale est supérieure à 12°C				
23	Nombre de jours avec Tmax>20°C	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où la température maximale dépasse 20°C (par mois ou par saison)	NB20	Tasmax	day_of_months_sup_20	get_warm_winter_days
	Nombre de jours avec Tmax>20°C - années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où la température maximale dépasse 20°C (par mois ou par saison)	NB20X	Tasmax	day_of_months_sup_20	get_warm_winter_days_extreme
24	Nombre d'heures de froid (Tmin<7°C)	Médiane sur 30 ans du cumul des heures de froid journalières (température minimale inférieure à 7°C) (par mois ou par saison)	NH7	Tasmax Tasmin	hour_below_7	get_hours_below_7
	Nombre d'heures de froid (Tmin<7°C) - années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans du cumul des heures de froid journalières (température minimale inférieure à 7°C) (par mois ou par saison)	NH7X	Tasmax Tasmin	hour_below_7	get_hours_below_7_extreme



Indicateurs mis de côté

Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable(s) DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans R	Formules des fonctions R associées
Cumul des jours de canicule	Médiane sur 30 ans de la somme des jours pouvant être considérées comme des canicules (seuils de températures minimales et maximales journalières par département) (par mois ou par saison)	NBCAN	Tasmin Tasmax	Jours_canicule	get_heatwave_days
Cumul des jours de canicule (Tmax>35°C et Tmin>24°C pendant 3 j successifs) - années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours pouvant être considérées comme des canicules (seuils de températures minimales et maximales journalières par département) (par mois ou par saison)	NBCANX	Tasmin Tasmax	Jours_canicule	get_heatwave_days_extreme
Durée maximale des canicules	Médiane sur 30 ans de la plus longue période (en jours) de jours de canicule consécutifs (par mois ou par saison)	DCAN	Tasmin Tasmax	Duree_canicule	get_max_heatwave_length
Durée maximale des canicules-années chaudes	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la plus longue période (en jours) de jours de canicule consécutifs (par mois ou par saison)	DCAN	Tasmin Tasmax	Duree_canicule	get_max_heatwave_length_extreme
Vitesse moyenne du vent	Médiane sur 30 ans de la vitesse moyenne du vent journalier en km/h (par mois ou par saison)	VVENT	Sfcwind	NA	get_mean_windspeed



Indicateur	Définition	Code associé dans le fichier de sortie	Variable(s) DRIAS utilisée pour le calcul	Variable intermédiaire dans R	Formules des fonctions R associées
Vitesse moyenne du vent - années venteuses	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la vitesse moyenne du vent journalier en km/h (par mois ou par saison)	VVENTX	Sfcwind	NA	get_mean_windspeed_extreme
Nombre de jours de grand vent	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où la vitesse moyenne du vent dépasse 5,28 m/s (par mois ou par saison)	NBVENT	Sfcwind	Jours_vent	get_wind_days
Nombre de jours de grand vent - années venteuses	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où la vitesse moyenne du vent dépasse 5,28 m/s (par mois ou par saison)	NBVENTX	Sfcwind	Jours_vent	get_wind_days_extreme
Nombre de jours de faible rayonnement	Médiane sur 30 ans de la somme des jours où le rayonnement est inférieur à 200 W/m ² (par mois ou par saison)	NBRAY	Rsds	Jours_faible_ray	get_low_irradiation_days
Nombre de jours de faible rayonnement - années sombres	4/5 ^{ème} valeur sur 30 ans de la somme des jours où le rayonnement est inférieur à 200 W/m ² (par mois ou par saison)	NBRAYX	Rsds	Jours_faible_ray	get_low_irradiation_days_extreme

8.4 ANNEXE 4 - Fiches impacts

Pour tous les détails, un fichier Excel a été élaboré.

8.4.1 Impacts qui peuvent concerner plusieurs espèces

Processus/pratique impactée	Impact possible	Paramètre climatique
Développement de la plante	Une température de sol élevée entraîne des difficultés d'enracinement.	Température du sol élevée
	Sous abri : les températures plus élevées entraînent une augmentation de la transpiration des plantes et donc une augmentation du besoin en eau.	Températures plus élevées/extrêmes
Bioagresseurs et auxiliaires	Les températures plus élevées/extrêmes pourront mettre en échec certaines stratégies de lutte (gènes de résistance thermosensibles, biocontrôle par champignons, parasitisme)	Températures plus élevées/extrêmes
	Les températures plus élevées entraînent des conditions favorables à l'acclimatation de nouveaux bioagresseurs et/ou à un changement de l'aire de répartition de ravageurs émergents.	Températures plus élevées/extrêmes
	Les températures plus élevées pourront favoriser les bioagresseurs déjà présents : + de générations par an, + de viroses car + d'insectes, et symptômes de viroses + marqués sur des plantes stressées.	Températures plus élevées/extrêmes
	Les adventices pourraient émerger plus tôt si les températures et les précipitations augmentent, et être plus compétitives avec le taux atmosphérique de CO ₂ plus élevé. Si le temps est sec, la pression pourrait en revanche être moins forte.	Températures plus élevées Précipitations/sécheresse
	L'augmentation de la température du sol perturbe les cycles des vers de terre et des taupins (ils ont tendance à descendre dans le sol et à mourir), ainsi que des nématodes, et peut entraîner l'apparition de maladies (verticilliose).	Température du sol élevée
	Sous abri : les températures plus élevées entraînent une augmentation du risque de maladies, notamment en légumes fruits.	Températures plus élevées/extrêmes
	Le gel fragilise les plantes, et la survenue moins fréquente du gel peut diminuer le risque d'attaques bactériennes.	Réduction du gel
	La réduction de la fréquence du gel facilite la survie de bioagresseurs et leur maintien d'une année à l'autre, avec un risque d'infestations + précoces et + fortes.	Réduction du gel
	Un temps plus sec diminue le risque de maladies.	Sécheresse
	Sous abri : le vent peut influencer la pénétration des insectes dans les serres.	Vent
Fonctionnement de l'exploitation	Les températures plus élevées et/ou les canicules peuvent impacter la production de plants : risques	Températures plus élevées/extrêmes

	de télescopage des séries et difficulté à sécuriser la production.	
	L'augmentation des températures entraîne des difficultés à caler les itinéraires techniques (maturation décalée en tomate grappe, compression des dates de récolte des légumes feuilles et irrégularité des coupes), un décalage dans le temps des calendriers culturels et une difficulté à trouver de la demande au moment de la récolte.	Températures plus élevées/extrêmes
	Les températures plus élevées peuvent permettre de démarrer la saison plus tôt au printemps et de rallonger les cycles à l'automne (seulement s'il n'y a pas de précipitations importantes ou de gel précoce).	Températures plus élevées/extrêmes
	Le stress thermique imposé aux opérateurs par les températures extrêmes implique d'aménager les plannings et de revoir l'organisation du travail sur l'exploitation.	Températures plus élevées/extrêmes
	Les températures élevées/extrêmes compliquent les traitements : les conditions favorables sont plus difficiles à trouver.	Températures plus élevées/extrêmes
	Les températures élevées/extrêmes entraînent une dégradation plus rapide des consommables plastiques.	Températures plus élevées/extrêmes
	Les restrictions d'eau imposent des aménagements de planning pour irriguer aux heures autorisées.	Sécheresse
	La sécheresse entraîne une augmentation de la demande en eau d'irrigation et des conflits autour des usages de l'eau.	Sécheresse
	Des inondations peuvent perturber l'accès aux parcelles.	Excès d'eau
	Le vent peut provoquer des dégâts sur les infrastructures.	Vent
Fertilité des sols	Une température de sol élevée peut provoquer une surminéralisation de la matière organique (si le sol est humide).	Température du sol élevée

8.4.2 Impacts sur la tomate

Processus impacté	Impact possible	Paramètre climatique
Développement de la plante	L'optimum de température pour les plantes C3 de saison chaude est de 25-27°C. Au-delà, les stomates se ferment pour éviter la transpiration, et la photosynthèse diminue.	Température plus élevées ou extrêmes
	Sous abri : la pollinisation peut être impactée par les fortes chaleurs car les bourdons sont moins actifs. En cas d'humidité et/ou de températures supérieures à 30°C, il y a un risque de pollinisation insuffisante (en + du manque d'insectes).	Température plus élevées ou extrêmes
	Les températures élevées à la floraison impactent la production de fruits : défauts de nouaison, coulures, mauvais développement des fleurs, avortement, problèmes de production et de qualité du pollen (au-delà de 32°C le jour et 27°C la nuit) + des fruits plus petits et de moins bonne qualité (coups de soleil, nécrose apicale, collet vert et craquèlements des fruits). L'effet est d'autant plus marqué si la température dépasse 30°C ou si on a une longue période de stress thermique. Quelques heures à 35-40°C compromettent fortement la nouaison.	Température plus élevées ou extrêmes
	Sous abri : au-delà de 32°C, le lycopers (couleur rouge) n'est plus produit par la plante.	Température plus élevées ou extrêmes
	Un stress hydrique en période de floraison peut provoquer l'abscission des fleurs (diminution de la photosynthèse et de l'allocation d'assimilats aux fleurs).	Sécheresse
	Un excès d'eau entraîne une accumulation d'éthylène liée au manque d'oxygène aux racines (de manière plus marquée si la température est élevée).	Excès d'eau
Qualité	La sécheresse peut améliorer la qualité des fruits : taux de vitamine C et taux de sucres plus élevés, moins de fruits fendus (mais calibre + petit et rendement plus faible).	Sécheresse
	La sécheresse peut entraîner une irrégularité de l'irrigation qui favorise la nécrose apicale.	Sécheresse
	Un rayonnement élevé provoque des brûlures sur les fruits.	Rayonnement
	Sous abri : l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la transpiration en journée, et donc un risque plus marqué de nécrose apicale.	Température plus élevées ou extrêmes

Seuils :

- Humidité
 - o Humidité supérieure à 80% : risque de maladies.
 - o Humidité inférieure à 40% : risque acariose/oïdium et fécondation perturbée.
- Optimum de température
 - o Germination : 20-25°C
 - o Développement : 15-17°C la nuit et 18-24°C le jour. Seuil large : 12-28°C. Risques en-dessous de 10°C et à + de 30-35°C, mais varie selon la durée d'exposition.

8.4.3 Impacts sur la salade

Processus impacté	Impact possible	Paramètre climatique
Développement de la plante	Les températures élevées entraînent la montaison des salades qui deviennent invendables. Des températures trop élevées à partir d'avril peuvent entraîner la montée à graine sans pomaison, et le même phénomène s'observe en cas de sécheresse. Les créneaux automne précoce (plantation début septembre) et printemps sont menacés.	Température plus élevées ou extrêmes Sécheresse
Bioagresseurs et auxiliaires	Les grandes amplitudes de température favorisent le développement de fusariose.	Amplitude thermique
	Des précipitations importantes au printemps augmentent le risque de maladies en fin de cycle des cultures d'hiver.	Excès d'eau
Qualité	Les températures élevées augmentent le risque de tip burn et de coups de soleil en plein champ (ainsi que des problèmes au stockage).	Température plus élevées ou extrêmes
	<i>Sous abri : l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la transpiration en journée, et donc un risque plus marqué de tip burn.</i>	<i>Température plus élevées ou extrêmes</i>
	Le manque d'eau pourrait influencer positivement la qualité nutritionnelle.	Sécheresse
	La sécheresse entraîne un risque plus important de pertes au champ.	Sécheresse
	Le déficit hydrique entraîne un risque plus important de tip burn.	Sécheresse

Seuils :

- Optimum de température
 - o Germination : 18-22°C
 - o Croissance des plants : 12-15°C
 - o Développement : 12-15°C le jour, 10-12°C à partir du stade prépomaison. La pomaison s'effectue autour de 20°C.
- Besoin en eau de la plante : 110 mm (laitue de printemps), 140 mm (laitue d'été). Optimum d'apport en irrigation : 170-190 mm

8.4.4 Impacts sur le melon

Processus impacté	Impact possible	Paramètre climatique
Développement plante	L'optimum de température pour les plantes C3 de saison chaude est de 25-27°C. Au-delà, les stomates se ferment pour éviter la transpiration, et la photosynthèse diminue.	Température plus élevées ou extrêmes
Fécondation	Sous abri : la pollinisation peut être impactée par les fortes chaleurs car les bourdons sont moins actifs.	Température plus élevées ou extrêmes
Production de fruits	Les températures élevées entraînent une maturation + lente et un nombre de fruits réduits.	Température plus élevées ou extrêmes
Qualité	Les fortes chaleurs entraînent une sensibilité à l'éclatement, des problèmes de conservation et des risques d'oidium, mildiou et pucerons. Les températures élevées en été peuvent rendre difficile la production de melon tardif. Le créneau bâche tardif est déjà délicat à conduire dans le Sud-Est.	Température plus élevées ou extrêmes
Qualité	Les températures élevées améliorent la qualité gustative des melons en créneau chenille précoce/bâche.	Température plus élevées ou extrêmes
Conservation	Les fortes chaleurs entraînent des problèmes de conservation du melon en post-récolte.	Température plus élevées ou extrêmes

Seuils :

- Optimum de température
 - o Elevage des plants : 20-25°C le jour, inférieur à 28°C.
 - o Développement : 18-30°C le jour, 16-18°C la nuit.

8.4.5 Impacts sur l'aubergine

Seuils :

- Humidité
 - o Humidité supérieure à 65% : risque de maladies.
- Optimum de température
 - o Développement : 18°C la nuit et 25°C le jour. Au-dessus de 35°C : défauts de pollen, floraison retardée (seuil + bas si l'hygrométrie est basse). Développement très ralenti en-dessous de 15°C et fertilité réduite en-dessous de 20°C.

8.5 ANNEXE 5 - Atelier du 12 juillet : visuel des échanges de la phase « Diagnostic de vulnérabilité »

