

Présenté par

Léon Sota

Pour obtenir le diplôme
d'ingénieur agronome

Sujet :

Prospective sur les demandes en eau pour l'agriculture :

Évaluation de méthodes pour quantifier les scénarios de
demande et consommation d'eau par l'agriculture

Soutenu publiquement le 04 octobre 2024

à l'Institut Agro Montpellier,

Devant le jury suivant :

Roger MOUSSA

Rapporteur externe

Salomé SCHNEIDER

Maître de stage

Gilles BELAUD

Tuteur académique

François COLIN

Président de Jury

Spécialité : *BESTE, Biodiversité, Eau, Sol, Climat, Évaluation Environnementale.*

RESUME

Soumise à des pressions multiples, la ressource en eau voit sa disponibilité en déclin. Les Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE) succèdent aux Plans de gestion de la ressource en eau (PGRE) avec l'objectif de faire l'évaluation des usages de l'eau en incluant un volet prospectif de l'évolution de l'état de la ressource en lien avec le changement climatique.

Plusieurs jeux de données climatiques, modèles de culture, outils d'aide à la décision (OAD) et indicateurs plus ou moins complexes existent pour décrire l'effet du changement climatique sur une grande partie des composantes hydrologiques d'un bassin versant. Mais un état de l'art sur l'utilisation de ces outils pour quantifier en particulier l'évolution des besoins en eau d'irrigation des cultures en fonction du changement climatique nous montre que ce point précis mérite d'être approfondi. En particulier dans les rapports existants sur les PTGE, très peu d'informations sont disponibles sur les méthodes qui seront utilisées pour prendre en compte cet aspect dans la mise en place de scénarios prospectifs.

Nous avons donc utilisé STICS, Aquacrop, Cropwat, Optirrig et WaLIS, différents modèles de culture et OAD, pour modéliser l'évolution des besoins en eau d'irrigation des cultures sur un horizon proche (2025-2050), moyen (2050-2070) et lointain (2070-2100) et en fonction des prévisions climatiques des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 émis par le GIEC. Nous utilisons la plateforme SICLIMA de l'unité de recherche AgroClim pour calculer des indicateurs agro et éco-climatiques permettant de faire une description annexe de l'évolution des besoins des cultures. Ces outils ont été appliqués à la région des Alpes de Haute Provence, en particulier aux sous bassins versants de l'Asse, Calavon et Largue, et à une zone d'étude traversant les départements de l'Aude, l'Hérault et le Gard.

Un premier objectif était de comparer les données issues de la modélisation avec différents modèles, ainsi qu'avec des données réelles d'irrigation pour tester la pertinence des modèles. Ces outils sont majoritairement fonctionnels et permettent d'observer clairement les tendances des besoins en eau d'irrigation, généralement à la hausse avec le changement climatique. Ils permettent d'observer et de quantifier les différents besoins entre une année sèche, médiane et humide, en gardant généralement une cohérence intra-modèle. Néanmoins, ils sont de précision variable et la quantification de l'évolution des besoins doit être prise avec des pincettes.

Les indicateurs agro et éco-climatiques sont des outils qui permettent de faire l'évaluation de l'évolution des conditions thermiques et hydriques au moment des différents stades phénologiques des cultures en fonction de leur décalage dans le temps avec le changement climatique. Nous avons simulé plusieurs de ces indicateurs sur les zones d'intérêt, et essayé de modéliser l'évolution des besoins en eau d'irrigation de cultures variées en fonction des résultats de ces indicateurs agro et éco-climatiques. Les résultats ont été parfois positifs car modélisables et cohérents, et parfois négatifs car non modélisables pour l'instant, nous montrant que les modèles restent donc des outils à développer pour mieux décrire l'évolution des besoins en eau d'irrigation.

MOTS CLÉS

Besoin en eau d'irrigation, Prospective, Modèles de culture, STICS, Aquacrop, WaLIS, Cropwat, Optirrig, scénarios climatiques, indicateurs Agro-climatiques, indicateurs Eco-climatiques

REMERCIEMENTS

Je remercie Salomé et Gilles, maîtres et tuteurs de mon stage. Salomé et Gilles ont toujours été disponibles et attentifs au bon déroulement du stage, ainsi qu'aux avancées des travaux. Je sais à quel point c'est une chance pour moi d'avoir eu des personnes attentives à mon travail et à ma santé dans mon entourage.

Au sein de l'équipe de l'UMR, je tiens également à remercier Frank de s'être occupé de moi dès que j'en avais besoin, Sylvie et sa grande efficacité, Kevin, Laetitia, Yassin, Cédric et le reste des membres pour leur accueil très bienveillant.

Je remercie infiniment les partenaires et membres de la Chaire partenariale « Eau, Agriculture et Changement Climatique » (EACC) extrêmement bienveillants, à l'écoute et disponibles pour m'aider pendant le stage. Entre eux, Christophe Lafon, Mireille Brun, Agathe Siracuse, Christian Charbonnier, Sami Bouarfa, Victor Moinard, Claire Richert, Nicolas Urruty. Merci pour leur aide, leur contact, et pour la mise à disposition de données utiles à la réalisation du projet.

Merci à François Gontard de BRLi, toujours intéressé par le projet et qui a mis à ma disposition des données essentielles à l'avancement de mon travail.

Je remercie Carina Furusho Percot et toute l'équipe d'Agroclim de m'avoir accueilli au site d'Avignon avec une énorme gentillesse et le temps qu'ils m'ont consacré pour l'explication du fonctionnement de leurs outils. Merci Marie Launay d'avoir pris le temps de travailler avec moi, merci Iñaki de Cortazar Atauri d'avoir permis cet échange.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	2
MOTS CLÉS	2
REMERCIEMENTS	3
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	8
1. INTRODUCTION.....	9
2. LA MÉTHODOLOGIE MISE EN PLACE POUR RÉPONDRE AUX OBJECTIFS DU STAGE 10	
3. ÉTAT DE L'ART SUR LA CONSTRUCTION DE SCENARIOS PROSPECTIFS ET LES INDICATEURS AGRO-CLIMATIQUES.....	11
3.1. Contexte	11
3.1.1. Les scénarios prospectifs dans le cadre des PTGE.....	11
3.1.2. Les scénarios dans le cadre des autres projets prospectifs	12
3.2. Les modèles et outils utiles à la prospective	14
3.2.1. Contexte.....	14
3.2.2. Les modèles de culture et autres outils d'aide à la décision	14
3.2.3. Conclusion.....	17
3.3. Des indicateurs agro-climatiques pour mettre en lumière les effets du changement climatique 18	
3.3.1. Contexte.....	18
3.3.2. Focus sur des indicateurs communément utilisés.....	18
3.3.3. D'autres indicateurs agro-climatiques en lien à la disponibilité en eau	18
3.4. Bilan	19
3.4.1. Des inconnues concernant l'élaboration de scénarios prospectifs dans le cadre des PTGE. 19	
3.4.2. Des éléments à investiguer plus en détail pour consolider la construction de scénarios prospectifs	20
3.4.3. Des indicateurs agro et éco climatiques manquants.	20
4. L'UTILISATION DE MODÈLES DE CULTURE POUR ESTIMER LES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION	20
4.1. Comparaison préalable des différents modèles	20
4.2. L'utilisation des modèles sur des zones d'étude spécifiques	22
4.2.1. Des zones d'étude permettant de décrire le bassin méditerranéen	22
4.2.2. La méthodologie standard utilisée pour estimer les besoins en eau avec les modèles de culture 28	
4.2.3. Résultats de la modélisation	30

5.	L'UTILISATION ET LE CALCUL D'INDICATEURS AGRO ET ECO-CLIMATIQUES	36
5.1.	Objectifs	37
5.2.	Méthodologie.....	37
5.3.	Résultats : les indicateurs extraits et calculés.....	38
5.3.1.	Indicateurs agro climatiques « simples ».....	38
6.	LIMITES ET DISCUSSION.....	43
6.1.	Limites de l'étude et de la méthodologie	43
6.1.1.	Le choix des modèles et des données climatiques.....	43
6.1.2.	Des incertitudes sur certaines de données	43
6.2.	La pertinence des modèles de culture et leurs limites	44
6.3.	Les résultats de la modélisation peuvent être affinés	46
6.4.	Des pistes pour des indicateurs agro et éco-climatiques à détailler.....	47
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	48
7.1.	Conclusion sur l'utilisation des outils et leur pertinence pour répondre aux objectifs du projet.	48
7.2.	Perspectives.....	49
	ANNEXES	51
	Annexe 1 : Acronymes.....	51
	Annexe 2 : Glossaire	52
	Annexe 3 : Illustrations	53
	BIBLIOGRAPHIE.....	67

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Zone d'étude superposée aux bassins versants de l'Asse, Calavon et Largue dans le département des Alpes de Haute Provence	23
Figure 2 : Assolement des parcelles cibles dans la zone d'étude de l'Asse (Source : Chambre d'agriculture Alpes de Haute-Provence, 2023).	24
Figure 3 : Assolement des parcelles cibles dans la zone d'étude de l'Asse après simplification.....	25
Figure 4 : Branchements des bornes de prélèvements d'eau pour l'irrigation sur le réseau hydraulique régional (RHR) (Source : données partagées par BRLi)	26
Figure 5 : L'assolement de la zone d'étude sur les trois départements Aude-Hérault-Gard (Source : données BRLi).....	26
Figure 6 : Évolution des besoins en eau annuels modélisés avec Aquacrop pour le RCP 4.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur le bassin versant de l'Asse, pour des horizons proche, moyen et lointain.	34
Figure 7 : Évolution des besoins en eau annuels modélisés avec Aquacrop pour le RCP 8.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur le bassin versant de l'Asse pour des horizons proche, moyen et lointain.	34
Figure 8 : Évolution des besoins en eau modélisés avec Aquacrop pour le RCP 4.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard, pour des horizons proche, moyen et lointain.	35
Figure 9: Évolution des besoins annuels en eau modélisés avec Aquacrop pour le RCP 8.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard, pour des horizons proche, moyen et lointain.	35
Figure 10 : Transpiration et quantité finale d'eau dans le sol en fonction de la quantité de résidus organiques appliquée pour une culture de soja, année 2019, bassin versant de l'Asse.	36
Figure 11 : Evaporation et interception de la pluie en fonction de la quantité de résidus organiques appliquée pour une culture de soja, année 2019, bassin versant de l'Asse.	36
Figure 12 Évolution du pourcentage de jours sans pluie sur le stade phénologique de la Véraison (Vigne) entre 2020 et 2100, dans le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5	39
Figure 13 : Évolution de la quantité de jours de déficit en eau pendant le semis et les 10 jours consécutifs (blé dur) entre 2020 et 2100, dans le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5.	40
Figure 14 : Évolution du jour de fin du risque de gel (Vigne) entre 2020 et 2100, dans le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5.	40
Figure 15: Évolution des dates des stades phénologiques du maïs dans la période 2020-2100 sur le bassin versant de l'Asse pour le RCP 4.5. La description des stades phénologiques se trouve en annexe 3, tableau 16	41
Figure 16 : Rendement de la betterave modélisé par Aquacrop sur un horizon proche (2020-2050), un horizon moyen (2050-2070) et un horizon lointain (2070-2100) pour une année sèche AS, une année médiane AM, et une année humide AH, sur le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5.....	42
Figure 17 : Durée du cycle de la betterave modélisée par Aquacrop sur un horizon proche (2020-2050), un horizon moyen (2050-2070) et un horizon lointain (2070-2100) pour une année sèche AS, une année médiane AM, et une année humide AH, sur le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5.....	42
Figure 18 : Besoins optimaux en eau d'irrigation de la betterave modélisés par Aquacrop sur un horizon proche (2020-2050), un horizon moyen (2050-2070) et un horizon lointain (2070-2100) pour une année sèche AS, une année médiane AM, et une année humide AH, sur le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5	42

<i>Figure 19 : Carte d'avancement des PTGE sur le bassin Rhône-Méditerrané. Source : (Projets de Territoires pour la Gestion de la ressource en Eau (PTGE) L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée, s. d.)</i>	53
<i>Figure 20: Les PTGE et autres démarches concertées de la gestion de l'eau dans le bassin Adour Garonne (Source : SIEAG - Portail des Données sur l'Eau du Bassin Adour-Garonne)</i>	54
<i>Figure 21 : La démarche prospective du projet « Aqua 2030 » (Source : Commissariat Général au développement durable, 2013)</i>	54
<i>Figure 22: Logigramme schématisant les objectifs du stage de façon chronologique.</i>	57
<i>Figure 23: Diagramme de Gantt pour la réalisation des différentes étapes du stage</i>	58
<i>Figure 24 : Les outils numériques pour la gestion de l'eau en agriculture (Source : Aspexit)</i>	59
<i>Figure 25 : Schéma expliquant les différences entre indicateurs agro climatiques et éco climatiques .</i>	62
<i>Figure 26 : Évolution des dates des stades phénologiques du blé dur dans la période 1960-2020 sur le bassin versant de l'Asse pour le RCP 4.5</i>	63
<i>Figure 27 : Exemple d'interface de modèle de culture après modélisation d'une culture de betterave, année 2031. Tr : transpiration, CC : Surface foliaire, Dr : Épuisement de la zone racinaire.</i>	65
<i>Figure 28: Exemple d'interface de modèle de culture après modélisation d'une culture de betterave, année 2031. Résultats sur le bilan hydrique.</i>	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison des principes de chaque outil de modélisation étudié ainsi que de leurs principales caractéristiques.....	21
Tableau 2 : Bilan des données sur les besoins en eau d'irrigation, les prélèvements en eau et sur la description des territoires disponibles pour les deux zones d'étude.....	27
Tableau 3 : Bilan des données climatiques disponibles sur deux zones d'étude.....	27
Tableau 4 : Bilan des années décennales sur l'ensemble des périodes à modéliser.....	30
Tableau 5: Besoins optimaux en eau simulée avec les modèles Aquacrop et Cropwat sur la période 2003-2023 pour le bassin versant de l'Asse pour différentes cultures	31
Tableau 6 : Tableau comparatif entre les besoins en eau modélisées et « réels » à l'échelle du bassin versant de l'Asse	32
Tableau 7 : Tableau comparatif entre les besoins en eau modélisées et prévisionnels pour le bassin versant de l'Asse.....	33
Tableau 8 : Besoins en eau d'irrigation réels et simulés par Cropwat sur une année médiane (2019) et une année sèche (2022) sur l'ensemble de zone d'étude Aude-Hérault-Gard.....	33
Tableau 9 : Besoins en eau d'irrigation de la vigne réels et simulés par deux modèles de culture pour une année médiane (2019) et une année sèche (2022) sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard.....	33
Tableau 10 : Récapitulatif des outils, indicateurs et modèles utilisés par les projets prospectifs pour mettre en place des scénarios prospectifs en lien à la ressource en eau en France.....	56
Tableau 11 : Dates de semis et de récolte utilisés pour la modélisation	60
Tableau 12: Besoins en eau optimaux d'irrigation modélisés avec STICS sur le bassin versant de l'Asse.....	60
Tableau 13 : Besoins en eau par culture issus du référentiel des besoins en eau d'irrigation de la région PACA	61
Tableau 14 : Besoins optimaux d'irrigation modélisés par Cropwat pour différentes cultures sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard.....	61
Tableau 15: Besoins en eau issus du référentiel des besoins en eau d'irrigation BRLi, tirés de la station Montpellier	61
Tableau 16 : Description de chaque stade utilisé pour le calcul d'indicateurs sur Agroclim.....	62
Tableau 17 : Extrait des données de prélèvements réels d'eau d'irrigation aux bornes sur la zone Aude-Gard-Hérault.....	64

1. INTRODUCTION.

Soumise à des pressions multiples, la ressource en eau douce voit sa disponibilité en déclin malgré son importance dans les enjeux agricoles et environnementaux actuels (*SDES, s. d.*). Les déficits hydriques liés aux sécheresses multiples ont une incidence directe sur la difficulté des territoires à assurer certaines activités économiques, dont la production agricole. Des tensions naissent autour de la gestion de l'eau remettant en question la capacité des territoires à maintenir leurs niveaux de production actuels.

C'est dans ce cadre que les PTGE (Projet Territorial pour la Gestion de l'Eau) ont été proposés à l'issue des *Assises de l'eau* de 2019 pour gérer l'eau de manière opérationnelle et dans le but de rétablir l'équilibre quantitatif entre besoins et ressource disponible tel que demandé par la DCE (Directive Cadre sur l'Eau). Ces projets ont pour objectif d'anticiper le changement climatique, de s'y adapter et d'instaurer un dialogue territorial avec l'ensemble des usagers d'un territoire. Un volet prospectif doit être intégré dans les PTGE, visant à étudier différents scénarios évaluant les conséquences possibles des pistes d'évolution des territoires dans un contexte de changement climatique. La mise en place d'un PTGE se fait en trois phases. Une phase d'émergence avec la définition du périmètre géographique, le recueil des attentes et l'écriture d'une feuille de route pour le projet. Une deuxième phase permet de faire l'état des lieux et le diagnostic sur les besoins partagés du territoire dans le but de satisfaire les besoins des différents acteurs et de préserver la qualité des cours d'eau. Une dernière phase permet d'élaborer les scénarios et faire le choix du programme d'action après avoir réalisé l'étude comparée de ces scénarios.

L'implantation des PTGE est très hétérogène en France (figures 20 et 21 de l'Annexe 3 : Illustrations). Un PTGE s'applique à un bassin versant (de 100 à 1000 km²) en réponse aux enjeux locaux. Il doit se construire en concordance avec les SDAGE et les SAGE s'ils existent. L'objectif étant de préserver la gestion équilibrée de l'eau en améliorant le partage, la communication et la gouvernance, sans dégradation des écosystèmes et ce, dans un contexte de changement climatique.

Nous avons étudié avec ce stage les problématiques spécifiques liées à l'élaboration de scénarios prospectifs sur la ressource en eau. Celles-ci sont liées à la difficulté du processus de concertation entre l'ensemble des acteurs du territoire pour la construction de scénarios prospectifs complets. Par exemple, il existe déjà plusieurs outils, modèles et études permettant d'évaluer les impacts de différentes projections climatiques sur l'hydrologie des bassins versants et donc d'évaluer comment ces changements affecteront la disponibilité en eau pour les cultures¹. Cependant, l'étude de l'évolution des besoins en eau d'irrigation des cultures avec le changement climatique, reste floue. L'objectif du stage est donc de travailler sur l'évolution de ces besoins en eau (voir lexique en Annexe 2 : Glossaire) en lien avec le changement climatique avec un volet sur la **modélisation** qui consiste à tester des modèles selon plusieurs scénarios climatiques et analyser leur pertinence comme outils bénéfiques ou non pour les porteurs de PTGE et autres projets prospectifs. Le deuxième volet consiste à étudier l'existence et l'utilité **d'indicateurs agro-climatiques** en lien à la mise en place de PTGE également. Ce volet contient également une partie sur le calcul de nouveaux indicateurs mieux adaptés à cette optique de travail cherchant à mieux décrire et prévoir l'impact du changement climatique sur les besoins en eau des cultures.

¹ Les résultats de simulations dans le cadre du projet « Explore 2 » ont été regroupés sur la plateforme DRIAS <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244> et <https://www.drias-eau.fr/>

2. LA MÉTHODOLOGIE MISE EN PLACE POUR RÉPONDRE AUX OBJECTIFS DU STAGE

Nous avons travaillé sur plusieurs approches pour qualifier un ensemble de méthodes permettant de quantifier les scénarios de demande en eau par l'agriculture. La méthodologie globale du projet est illustrée dans les figures 23 et 24 de l'Annexe 3 :

La première étape du stage a consisté à la recherche d'informations sur les PTGE et autres projets prospectifs avec l'objectif de rédiger un état de l'art sur les méthodes et outils utilisées par ceux-ci pour estimer l'impact du changement climatique sur l'évolution des besoins en eau d'irrigation des cultures (Partie 3). En particulier, nous cherchions à savoir si les PTGE utilisent des modèles de culture ou des outils pour la réalisation de bilans hydriques - dans le cadre de la mise en place de scénarios prospectifs - permettant d'estimer les besoins en eau d'irrigation des cultures en fonction des conditions climatiques locales. Nous cherchions également à déterminer si des indicateurs agro et éco-climatiques (voir l'Annexe 2 : Glossaire) particuliers étaient utilisés pour quantifier ou qualifier ces besoins. Après cet état de l'art, nous pouvions donc procéder à l'évaluation de ces outils et de leur pertinence.

La deuxième étape du stage a ensuite consisté à mener une réflexion sur les territoires et zones géographiques sur lesquelles nous voulions travailler pour tester et qualifier les méthodes prospectives. Nous avons choisi de travailler sur trois régions différentes du bassin méditerranéen, nous permettant d'avoir une vue d'ensemble sur le Sud de la France. Premièrement, la région des Alpes de Haute-Provence a été choisie car un projet pour la détermination de solutions pour l'adaptation au changement climatique en lien à la ressource en eau (Chambre d'agriculture Alpes de Haute-Provence et al., 2023) est mené par des partenaires de la chaire Eau, Agriculture et Changement Climatique (EACC) dans cette région, plus spécifiquement sur les sous-bassins versant de l'Asse, du Calavon et de Largue. Des données sur l'assolement du territoire et sur les prélèvements en eau pour l'irrigation sont donc disponibles dans cette région et seront utiles à la comparaison de nos résultats.

De la même façon, des partenaires travaillant pour BRLi sur les départements de l'Aude, de l'Hérault et du Gard, nous ont partagé des données connues et bien documentées sur ces trois départements de prélèvements d'eau pour l'irrigation de parcelles issues des compteurs de la région.

L'assolement de ces deux territoires est très différent, ce qui est en cohérence avec notre objectif de décrire l'ensemble du bassin méditerranéen.

En outre, nous avons cherché à travailler sur la région du Lauragais, spécialisée dans les grandes cultures, en opposition à l'Hérault où la vigne est dominante, et au Alpes de Haute-Provence où le profil de cultures est très varié. Pour des raisons de temps et de disponibilité des données, nous n'avons pas pu travailler sur cette région.

Une fois la sélection des zones d'étude faite, nous avons choisi les scénarios climatiques et les périodes à modéliser, puis nous avons cherché à utiliser les outils de modélisation afin de connaître l'évolution des besoins en eau d'irrigation en fonction de ces scénarios sur les territoires en question. Ensuite, nous avons prévu un déplacement à l'INRAE d'Avignon pour travailler une semaine avec l'unité Agroclim, qui nous permettrait de mieux comprendre l'utilisation de l'outil SICLIMA pour le calcul d'indicateurs agro et éco-climatiques. L'objectif était également de pouvoir calculer des indicateurs sur les zones d'étude et pour plusieurs cultures d'intérêt.

Enfin, nous avons analysé les résultats, pour prendre du recul sur l'utilité et la pertinence des outils que nous avons pu évaluer à répondre aux objectifs des PTGE émergents, c'est-à-dire de prendre en compte le changement climatique dans la gestion intégrée de la ressource en eau.

3. ÉTAT DE L'ART SUR LA CONSTRUCTION DE SCENARIOS PROSPECTIFS ET LES INDICATEURS AGRO-CLIMATIQUES

3.1. Contexte

La prise en compte du changement climatique est inscrite dans la définition des PTGE. Cet aspect différencie les Plans de Gestion de la Ressource en Eau (PGRE) avec les PTGE et implique l'utilisation de la prospective comme outil de diagnostic. Le guide d'élaboration des PTGE (*Ministère de la transition écologique, 2023*) concède d'ailleurs une partie entière à la prospective et à l'élaboration et co-construction des scénarios. Cet état des lieux sur les PTGE et autres projets prospectifs a donc pour objectif d'étudier les scénarios prospectifs, ainsi que la méthodologie utilisée pour anticiper le futur. En d'autres mots, quels modèles de culture et quels indicateurs agro-éco-climatiques existent pour mettre en place des scénarios puis des programmes d'action concrets associés. Il existe peu de PTGE achevés pour lesquels nous avons trouvé toutes ces informations. En effet, le concept de PTGE est jeune et encore peu de rapports existent faisant le bilan des scénarios, modèles ou indicateurs choisis. Ce manque d'information est particulièrement vrai quand on cherche à collecter des données sur la modélisation de la variation des besoins en eau en lien avec le changement climatique. C'est pourquoi nous avons fait également des recherches sur l'ensemble des projets prospectifs liés à la ressource en eau, et non uniquement les PTGE.

L'ensemble de nos recherches est basé sur de la bibliographie et des entretiens réalisés avec des experts. Ce stage à visée exploratoire n'a donc pas pour objectif la restitution de retours d'expérience au sujet des PTGE, issus de données collectées sur le terrain.

3.1.1. Les scénarios prospectifs dans le cadre des PTGE

D'après les recommandations du guide d'élaboration des PTGE (*Ministère de la transition écologique, 2023*), la construction des scénarios doit être faite à la suite de l'émergence d'un groupe organisé d'acteurs locaux, mettant en place une démarche initiée par un état des lieux et un diagnostic des enjeux. C'est suite à cette émergence, que peut ensuite avoir lieu l'élaboration du ou des programmes d'action des PTGE. Il est détaillé que l'élaboration de ce programme doit reposer sur l'examen de plusieurs scénarios, le premier étant le **scénario sans projet** (qui décrit ce qui se passerait dans le territoire s'il n'y avait pas de projet) et correspond à un **scénario de référence tendanciel** modélisant la prolongation des PGRE / SDAGE et ne prenant pas réellement en compte le changement climatique mais essentiellement les changements de l'encadrement réglementaire des conditions de prélèvements en période de basses eaux. Il est précisé que l'horizon temporel modélisé doit atteindre 30 ans au minima, tout en utilisant également les projections climatiques du GIEC. Un horizon de 50 ans peut également être envisageable. De façon récurrente, les projets prospectifs comme le projet « Life, Eau & Climat » établissent des horizons d'étude, 2021 à 2050 étant un horizon proche, 2041 à 2070 un horizon moyen et 2071 à 2100 un horizon lointain (*Stab & Lafont, 2023*).

Les autres scénarios recommandés sont un scénario « Sobriété », où l'on cherche à « réduire les consommations d'eau en développant les économies d'eau, et en faisant évoluer l'agriculture vers des productions moins consommatrices d'eau et favorisant l'augmentation de la capacité des sols à retenir l'eau et à réduire les intrants (agroécologie) », et un scénario de « satisfaction des usages économiques » cherchant à « sécuriser l'accès à l'eau pour l'agriculture et les autres usages, en augmentant la disponibilité de l'eau par un accroissement du stockage de l'eau hivernale ».

C'est donc un minimum de trois scénarios qui est recommandé, avec un scénario sans projet qui n'annonce aucune autre mesure que la réduction des prélèvements et deux scénarios modélisant des choix d'adaptations contrastés ou à ambition différente (en termes d'économies d'eau par exemple). Le guide mentionne pour cela l'utilité de s'appuyer sur les études prospectives qui ont déjà été faites sur la ressource en eau.

3.1.2. Les scénarios dans le cadre des autres projets prospectifs

Différents projets liés à la gestion durable de la ressource en eau comme le projet « Aqua 2030 », « Garonne 2050 » ou encore « Explore 2070 », se sont portés sur l'élaboration de scénarios prospectifs pour la gestion de la ressource en eau.

3.1.2.1. Le projet « Aqua 2030 »

Le projet « [Aqua 2030](#) » est un projet prospectif sur la ressource en eau mené par une trentaine d'experts principalement de l'IRSTEA (ancien INRAE) et du bureau d'études ACTeon réalisé en 2010. C'est une démarche qui propose l'élaboration de cinq scénarios exploratoires en comparaison à une situation de référence (« Situation 2010 »). Nous verrons que la méthodologie prospective repose souvent sur le choix d'une période de référence, un scénario tendanciel et d'autres scénarios parallèles modélisant différentes hypothèses. Cette démarche est représentée sur la figure 22 de l'Annexe 3 : Illustrations

Cinquante-deux variables ressortent de cette étude (*Commissariat général au développement durable., 2013*), réparties en six composantes : l'agriculture et l'Energie, à la biodiversité, la gouvernance, l'eau et les territoires, les industries et le contexte global. L'étude de l'évolution des variables sert à formuler des hypothèses pour décrire des scénarios contrastés. De plus, chaque variable a un poids différent sur les choix qui sont fait dans la création de scénarios prospectifs. Par exemple, le choix de l'assolement d'un bassin versant peut avoir un effet sur la consommation totale d'eau, mais la gouvernance locale, l'avis des agriculteurs, les accords européens (la PAC) et d'autres variables influencent également les scénarios possibles avec plus ou moins d'impact. Voici quelques-uns de ces scénarios :

- Un **scénario tendanciel** dans lequel est faite l'hypothèse d'un assolement peu impacté et avec le changement climatique qui suit son cours.
- Un **scénario « technologies douces »** dans lequel des variations dans l'assolement sont proposées (cultiver plus de variétés moins gourmandes en eau), une redistribution du calendrier de prélèvements pour diminuer le stress hydrique sur les cours d'eau, ou encore une agriculture en HPE : haute performance environnementale
- Un **scénario conduit par un changement des modes d'irrigation et la recherche de solutions techniques pour l'approvisionnement en eau douce** comme par exemple la désalinisation (scénario basé sur les nouvelles technologies). Des options comme l'agriculture de précision avec une irrigation mieux organisée sont proposées.
- Un **scénario de crise**, faisant primer l'économie. Celui-ci est caractérisé par une accentuation de la crise, une augmentation de la précarité, et une préférence sur les préoccupations sociales devant les environnementales. Les prélèvements augmentent sans contrôle.
- Un **scénario de changement institutionnel où le pouvoir est concentré localement**. Les préoccupations environnementales priment et la gestion des ouvrages est confiée aux régions puis aux euro-régions, avec une augmentation de l'agriculture intensive pour une production toutefois raisonnée, locale et européenne.

Finalement, seuls deux scénarios considèrent une possible évolution de l'assolement pour des cultures moins consommatrices (dont un à cause de la crise de l'eau) : le scénario « technologies douces » et le scénario de crise. Les autres voient la technologie comme une solution. Pour ce qui est des prélèvements,

deux scénarios considèrent d'augmenter les prélèvements agricoles pour l'irrigation, alors que les trois autres voient des prélèvements à la baisse (mais également à cause de la crise de l'eau).

3.1.2.2. L'étude « Charente 2050 »

L'étude prospective « Charente 2050 » (EPTB Charente, 2023), propose quant à elle quatre scénarios.

- Un scénario tendanciel, appelé scénario « Réglementaire » suite à un laisser faire, ou « *business as usual* » (BAU).
- Un scénario de libéralisation des marchés de l'eau, d'intensification de l'agriculture et de la demande, de dérégulation de la gestion de l'environnement pour faire face à la crise.
- Un scénario de remise en question avec la baisse de la demande en eau grâce à une relocalisation des cultures pour des choix agroécologiques et une utilisation de l'eau plus localisée.
- Un scénario de « Gestion globale » dans lequel les infrastructures de réserve sont créées pour anticiper le changement climatique et pallier le manque d'eau. C'est un scénario similaire au scénario technologique du projet « Aqua 2030 » dont il se différencie en proposant des plans d'actions pour l'anticipation.

Le PGRE du bassin versant de Buëch à cheval entre la Drôme, les Hautes-Alpes et les Alpes de Haute-Provence, met certaines des mesures du scénario « Gestion Globale » en place. Deux scénarios sont présentés pour le volet agricole : un scénario avec une conversion de l'irrigation à l'aspersion associée à la construction de retenues de stockage, et un autre scénario avec la déclinaison plus locale de ce type de projets cherchant également à faire des économies d'eau (Chambre d'agriculture des Hautes alpes & SMIGIBA, 2019). Dans cet exemple, l'augmentation des productions fourragères vise à être maintenue et favorisée car moins gourmandes en eau.

Les projets « Charente 2050 » et « Aqua 2030 » reposent sur une approche participative pour la mise en place d'une gouvernance logique, et pour la définition d'un plan d'action prenant en compte les besoins variés.

3.1.2.3. L'étude « Garonne 2050 »

L'étude prospective « Garonne 2050 » réalisée en 2010 (Agence de l'eau Adour Garonne, 2010) simule la demande en eau agricole en fonction du choix de l'assolement irrigué, d'un calage avec les données disponibles de prélèvements issues de bases de données de l'Agence de l'eau, et cette fois-ci, du calcul de la demande climatique en eau. Pour ce projet, les hypothèses mises en avant pour le choix des variables puis des scénarios sont semblables au projet « Aqua 2030 » : variation de l'assolement, variation des prélèvements et des débits des cours d'eau selon le changement climatique. Néanmoins, les scénarios construits, au nombre de trois, présentent des différences. Ils consistent à la compensation **minimale, partielle** ou **complète** des déficits hydriques créés par le changement climatique par rapport à l'utilisation actuelle de la ressource. Ces scénarios, intégrant des variations de l'assolement, ont été modélisés. Dans un scénario tendanciel où l'objectif est de maintenir 75% du débit objectif d'étiage (DOE) actuel, le déficit causé par le changement climatique est de 335 millions de m³ (Mm³). Or, avec une évolution de 30% de l'assolement vers des cultures moins gourmandes en eau, 10 Mm³ sont économisés sur les 335 Mm³. Cet ordre de grandeur nous permet de constater que les mesures visant à réduire les besoins en eau des cultures sont certes utiles mais restent à elles seules insuffisantes pour compenser le déficit creusé par le changement climatique.

Concernant les études prospectives nommées, les usages de l'eau liés à l'agriculture sont souvent décrits de façon similaire. Les besoins en eau varient selon le choix de l'assolement et de l'évolution du changement climatique (pour toutes les études, les hypothèses sur l'évolution climatique sont celles des scénarios RCP 4.2 et 8.5 du GIEC majoritairement, même si c'est le scénario A1B de +2,8°C de

réchauffement qui est choisi pour le projet « Explore 2070 » (Ministère de la transition *écologique*, 2023). En faisant varier l'évolution possible de l'assolement, du devenir de la PAC, du marché, des pratiques et des structures agricoles, il est possible de dessiner plusieurs scénarios prospectifs.

3.2. Les modèles et outils utiles à la prospective

3.2.1. Contexte

Nous cherchons à étudier spécifiquement l'évolution des besoins en eau avec le changement climatique à l'échelle de bassins versants. Certains modèles de cultures, et autres outils d'aide à la décision (OAD), peuvent être utiles à cet effet. Initialement, les modèles de cultures et OAD agricoles permettent de travailler sur l'itinéraire technique des cultures, tout en améliorant l'utilisation d'engrais, le calendrier d'irrigation et autres paramètres dans l'objectif d'obtenir un meilleur rendement, ou d'analyser les effets de changements de pratiques plus respectueuses de l'environnement. Plusieurs modèles comme **Aquacrop** de « L'Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture » (FAO) proposent d'analyser spécifiquement l'impact de l'irrigation des cultures sur le rendement (*Foster et al., 2017*). Le premier guide d'utilisation (*Raes et al., 2003*) date de 2003 et est en constante évolution depuis. Certains de ces outils se basent sur des bilans hydriques classiques et peuvent également être utilisés pour mesurer les besoins en eau des cultures sur une période choisie. Nous cherchons donc à voir si ces outils sont utilisés dans le cadre prospectif des PTGE et autres projets pour la ressource en eau.

Un OAD permettant de modéliser les besoins en eau se base toujours sur des données d'entrées qui peuvent être des données climatiques (pluviométrie, force du vent, rayonnement incident, températures, etc...), des données sur les sols (profondeur, structure et texture, réserve utile RU, porosité, etc...), des données sur les pratiques culturales (mulching, utilisation d'intrants, labour, etc...) et / ou des données sur les espèces et variétés cultivées. Ces données permettent de paramétrer l'OAD avec une précision plus ou moins grande qui dépendra de la disponibilité de données locales et de la complexité de modèles. La période modélisée peut être choisie selon la disponibilité des données climatiques, et la possibilité de modéliser plusieurs cultures ou plusieurs pratiques dépend de chaque outil. Ces OAD permettent de modéliser en sortie un bilan hydrique à l'échelle de la parcelle, et /ou le rendement, la surface foliaire et la biomasse à la fin des cycles de culture (et également pendant le cycle de culture pour certains modèles). Ils donnent également des informations sur les besoins en eau des cultures en fonction des données d'entrée et peuvent permettre d'évaluer des calendriers et des pratiques d'irrigation.

Les travaux prospectifs existants cherchent majoritairement à mesurer et à décrire l'impact du changement climatique sur l'hydrologie des cours d'eau sans prendre forcément en compte l'évolution des besoins en eau des cultures sur les périodes futures (*Les outils numériques pour la gestion de l'eau en agriculture*, 2023). Des modèles climatiques existent en abondance à cet effet, ainsi que des modèles utiles à la simulation des débits. Il existe également des modèles traitant de l'incidence socio-économique et environnementale du changement climatique (Commissariat général au développement durable., 2013), dont les détails ne seront pas pris en compte dans le cadre de ce stage.

3.2.2. Les modèles de culture et autres outils d'aide à la décision

Des exemples d'outils de prévision hydrologique sont cités dans le rapport du PTGE Serein-Armançon (*Rapport d'état des lieux – Serein et Armançon- Octobre 2022*) pour la modélisation de débits d'étiage (**PREMHYCE, Aqwi-FR, Gr4J**), l'estimation des volumes prélevables et la simulation du débit et des flux d'eau en surface (chaîne de modèles **Safran-Isba-Modcou**). L'utilisation de ces modèles ainsi que les modèles de culture fait appel à des données climatiques très souvent relevées par le projet [DRIAS](#)

(Ministère de la transition écologique, 2023) pouvant être corrigées ou complétées par des données issues du projet [SAFRAN](#) (voir le glossaire, annexes 4 et 5).

De plus, le logiciel d'optimisation d'assolement en système irrigué **LORA** est mentionnée dans le cadre du PTGE de la Boutonne (*PGE du bassin de la Charente*, 2015). Il s'agit d'un logiciel développé par l'ITCF (Institut Technique des Céréales et des Fourrages) et l'INRA. Le logiciel **Irré-LIS** conçu par Arvalis fait pour « concilier rendement et qualité grâce à une bonne maîtrise de l'irrigation » est également mentionné par la fiche de ce PTGE, et dans le cadre du projet prospectif « Varenne de l'eau » (*Ministère de l'agriculture*, 2021). **Irré-LIS** étant capable de calculer en temps réel l'état de la réserve utile en eau du sol, et des stades phénologiques des cultures, il s'agit possiblement d'un outil permettant d'estimer les besoins en eau d'irrigation.

Dans le cadre du PTGE Aume-couture, plusieurs méthodes sont présentées pour faire des économies d'eau et d'irrigation (*Comité de Territoire Aume-Couture - EPTB Charente*, s. d., 2018). L'outil **HYDRIM**, conçu par l'OUGC Cogest'eau est mentionné. Il permet d'améliorer la gestion collective des prélèvements d'irrigation et de mieux répartir les prélèvements selon les besoins hebdomadaires des prélèvements. Cet outil peut être utile dans l'optique d'une bonne gestion de l'irrigation mais non pour la prospective sur les besoins en eau.

Dans le cadre de la transition PGRE-PTGE dans les bassins versant de l'Asse et Largue-Calavon, une étude prospective est également menée avec plusieurs OAD pertinents (*DDT des Alpes de Haute-Provence*, 2018).

- **ASALEE**, développé par ARVALIS, est une application web qui permet de simuler et comparer des stratégies d'assolement et d'irrigation pour des parcelles choisies. Couplé à **Sisterre** (également un logiciel en libre accès d'ARVALIS, permettant de modéliser les performances technico-économiques: coûts de production, produits, marges, temps de travaux... de parcelles), ASALEE est un outil à première vue très pratique pour la mise en place de scénarios prospectifs à l'échelle d'un bassin versant. ASALEE est également mentionné comme un outil, levier d'adaptation au stress hydrique par la cellule de recherche RIT de l'INRAE (Cellule Recherche Innovation Transfert de L'INRAE, 2022). L'outil, **Moderato**, qui lui ressemble mais est spécialisé dans le maïs, peut également être cité.
- Les outils **OPTIRRIG** et **Aquacrop**, modèles de culture permettant de simuler le rendement en fonction de la consommation en eau des cultures, sont également mentionnés par le projet « Varenne de l'eau » (*Ministère de l'agriculture*, 2021) et par le « Guide sur la gestion de l'eau et des technologies numériques en agriculture » (*Les outils numériques pour la gestion de l'eau en agriculture*, 2023). Ces logiciels sont pertinents pour modéliser les besoins en eau d'irrigation des cultures variées, sur des périodes actuelles et futures dans le cadre de projets prospectifs visant à étudier l'évolution des besoins en eau de différents assolements dans un bassin versant.

Les mêmes projets (Asse / Largue-Calavon) proposent des **jeux sérieux** et d'autres types d'outils non spécifiés pour mesurer l'impact de nouvelles pratiques plus respectueuses de l'environnement et moins coûteuses en eau : l'agriculture de conservation des sols (ACS) et l'hydrologie régénérative en sont les exemples principaux, ainsi que les solutions fondées sur la nature (SFN, ou ex « services écosystémiques ») de façon globale. Ces jeux sont joués dans le cadre de concertations et de discussion entre acteurs du territoire.

Dans le guide cité ci-dessus, on voit que le modèle de culture Aquacrop est cité ainsi que des modèles de bilan hydrique qui sont utilisés pour estimer des rendements potentiels limités par la ressource en eau : **CERES**, **APSIM**, **CropSyst** ou **WaLIS** pour la vigne. La réserve utile et l'évapotranspiration des plantes sont les principaux facteurs limitants des estimations du bilan hydrique, notamment parce qu'il n'existe pas de relation linéaire simple entre la teneur en eau du sol et les besoins en eau de la plante.

Le rapport mentionne également les logiciels **Simult'eau** (INRAE), **Maelia**, ou encore **Wasabi** (Chaire ELSA PACT) pour le calcul de bilans hydriques à l'échelle de bassin versant. Ce sont des OAD qui permettent également de tester des scénarios climatiques, des aménagements hydrauliques, ou même des variations dans l'assolement au sein du bassin versant.

Le projet prospectif « [Explore 2070](#) » vise à explorer les liens entre les évolutions climatiques et l'hydrologie des bassins versants, à évaluer les impacts du changement climatique sur les territoires et à fournir des bases scientifiques pour construire des stratégies d'adaptation garantissant une gestion durable des hydrosystèmes. Dans ce cadre, le projet propose de former les acteurs au modèle **STICS** (*MOOC Explore2 / INRAE, s. d.*), un modèle de culture pour la simulation du fonctionnement plate-atmosphère à l'échelle de la parcelle. Il permet de comprendre l'évolution des besoins en eau d'irrigation des cultures, et de calculer les besoins en eau selon différentes pratiques culturales, ainsi que d'autres indicateurs pertinents liés au changement climatique (l'efficacité d'utilisation de l'eau, la variation des rendements avec l'augmentation de [CO₂]). C'est un des premiers projets à mentionner spécifiquement les modèles de culture comme un outil prospectif.

Pour la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) impliquant la prospective sur les tensions sur l'eau, l'OAD **STRATEAU**² est également un outil pertinent. Il a été mis en avant par le LSCE, laboratoire des sciences et du climat de l'environnement (Maugis et al., 2015). L'outil évalue d'une part les débits d'étiage, les prélèvements, et la demande en eau, mais il permet aussi de travailler sur l'estimation des besoins en eau d'irrigation des cultures. La méthodologie utilisée par STRATEAU et la *Société géologique du Nord* (Meilliez et al., 2023) dans le cadre de la prospective sur la ressource en eau repose sur le modèle de culture **CropWat**. Ce modèle estime l'évapotranspiration journalière maximale (ETM_j) des cultures à l'aide de la loi classique de Penman-Monteith. Plus de détails sont données dans la partie 2.2.3.

La modèle WaLIS est cité par *Aleksovska, 2020*, dans sa thèse et dans le cadre de l'utilisation d'OAD qui prennent en compte le changement climatique. La fiabilité des modèles est estimée dans le cadre de cette thèse, et WaLIS est considéré comme un modèle plus sensible aux incertitudes météorologiques. WaLIS est également cité dans la thèse de *Naulleau et al., 2022* pour l'estimation de la disponibilité en eau dans les sols de parcelles à vigne dans le cadre du projet « LACCAVE ».

Ce projet prospectif « LACCAVE » pour l'adaptation de la vigne au changement climatique (*V'innopole, 2013*) mentionne WaLIS comme un modèle utile à la prospective des stratégies d'adaptation, même si le modèle ne sert réellement qu'à calculer le bilan hydrique et des indicateurs de stress hydrique. Il est réservé à la vigne alors que le modèle **SIMETAW** permettant d'estimer des besoins en eau des cultures est utilisé dans le cadre du projet de recherche « TALANOVA » (Graveline et al., 2022) avec plusieurs cultures pour comprendre les variations des volumes d'eau estimés en fonction des différentes utilisations du sol, et des conditions climatiques.

Enfin, nous avons réalisé un entretien avec Jean Bertrand et Noémie Burq de la chambre d'agriculture des Pyrénées Orientales (PO) pour commenter la méthode prospective que leur groupe utilise dans le cadre de l'estimation de l'évolution des besoins en eau d'irrigation avec des outils simples à cet effet comme pour le projet « TALANOVA ». La chambre d'agriculture a mis en place un modèle simple issu de calculateurs sur **Excel**, en utilisant le principe du bilan hydrique. Ce modèle prend en compte des entrées climatiques, des données sur les sols et leurs occupations, et calcule les besoins en eau des plantes sur un territoire donné compte tenu du mode d'irrigation ou qui permet d'estimer la consommation en eau des cultures en fonction des conditions climatiques et du milieu.

Les membres de la chambre se basent pour l'instant sur un scénario proche du RCP 6.0, mais réfléchissent à changer pour modéliser les RCP 4.5 et 8.5. Le modèle en question est paramétré pour la

² Une description complète de l'outil est disponible sur le lien [suivant](#).

région des PO mais peut être utilisé dans d'autres régions. Les années modélisées correspondent à des années quinquennales ou décennales pour caractériser les périodes étudiées. Une année sèche, humide et une année moyenne sont donc modélisées pour décrire une période (souvent entre 2025 et 2050). Pour valider la pertinence du modèle, des comparaisons avec des données réelles de prélèvements d'eau pour l'irrigation sont faites malgré la complexité de l'interprétation de ces données. Il a été notifié que très souvent les prélèvements réels ne correspondent pas à ce qui devrait idéalement être appliqué aux cultures, et ceci pour des raisons variées comme par exemple une pratique d'irrigation non menée à l'optimum, ou les interdictions de la région.

3.2.3. Conclusion

Il y a une grande diversité d'outils et modèles de culture permettant de travailler sur les besoins en eau. Le guide sur la gestion de l'eau et des technologies numériques en agriculture cité précédemment recense une grande partie des outils d'aide à la décision ou de modélisation pour la gestion de l'eau sur la figure 24 de l'Annexe 3 : Illustrations. Ces outils peuvent être différenciés par leur niveau de complexité ou par leur nature.

- **STICS** (Beaudoin et al., 2023) est un modèle représentant de façon détaillée le développement d'un grand nombre de cultures et permettant de travailler sur plusieurs cultures de façon simultanée, d'intégrer un très grand nombre de données pour décrire le sol, le climat, les cultures et leurs stades phénologiques. Il permet également de travailler sur différents calendriers d'irrigation, sur des possibles rotations, et modéliser l'effet de pratiques culturales sur la réserve utile des sols, le rendement, les besoins en eau, etc.
- En parallèle, **Aquacrop** (*AquaCrop | Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024.; Foster et al., 2017*) est un modèle plus ou moins simple avec une interface pour la modélisation facilement utilisable. Il est possible de simuler avec ce modèle les besoins en eau des cultures en fonction des données climatiques, du sol et des cultures à l'échelle d'une parcelle. Une seule culture peut être modélisée à la fois.
- **Cropwat** (Clarke, 1998; *CropWat, 2023*) est un modèle plus simple, avec une interface interactive également qui permet de rapidement modéliser les besoins en eau des cultures et qui ne nécessite que de peu de données d'entrées. C'est un modèle cité plus de 40.000 fois dans la littérature scientifique, issu du guide de la FAO de 1998. Il est efficace pour modéliser un très grand type de cultures sur tous les climats paramétrables. Le modèle capitalise et simplifie la connaissance au niveau mondial sur le fonctionnement des cultures
- Ces modèles de culture contrastent avec des outils reposant sur la réalisation basique d'un bilan hydrique permettant de connaître les besoins en eau des cultures. **WaLIS**³ en fait partie, même si ce modèle est spécialisé dans la vigne. Il permet également de calculer des indicateurs de stress hydrique sur la vigne.
- Enfin, **Optirrig** réalise les mêmes tâches que WaLIS, mais permet de modéliser plusieurs cultures et également de simuler le développement de la surface foliaire (LAI) et le rendement de celles-ci. Il a spécifiquement été conçu pour l'estimation de besoins en eau d'irrigation, et inclut des variantes issues de projets étudiants des stratégies d'adaptation (agrivoltaïque, agriculture de conservation...).

³ https://www.vineas.net/fr/7_114/61373a503af11812979f1653/Le%20mod%C3%A8le%20WaLis.html

3.3. Des indicateurs agro-climatiques pour mettre en lumière les effets du changement climatique

3.3.1. Contexte

Les indicateurs climatiques sont des paramètres qui permettent de caractériser le climat sur une période donnée. Dans le cadre d'un diagnostic prospectif lors de la mise en place d'un PTGE, des indicateurs agro-climatiques ou éco-climatiques (voir la partie 5.3) peuvent être pertinents, en supplément des modèles, pour comprendre rapidement l'impact du changement climatique sur le développement des cultures et sur leur besoin en eau. Nous cherchons si des indicateurs agro ou éco-climatiques ont été créés, et utilisés pour la description de l'impact du changement climatique, et donc pour la constitution d'hypothèses alimentant les scénarios de projets prospectifs et de PTGE.

3.3.2. Focus sur des indicateurs communément utilisés

Le projet « Vers des systèmes de culture adaptés au changement climatique et à des ressources en eau contraintes en Haute Provence » (*Chambre d'agriculture Alpes de Haute-Provence, 2023; DDT des Alpes de Haute-Provence, 2018*) mené dans les bassins versants de l'Asse et Lorgne-Calavon reprend des indicateurs agro-climatiques classiques (températures moyennes, maximales, minimales, dernier jour de gel, nombre de jours de gel, ou de hautes températures, pluviométrie et déficit hydrique). Ces données nous ont été transférées directement par la chambre d'agriculture (CA) des Alpes de Haute Provence (CA04).

Les indicateurs agro-climatiques « classiques » (évapotranspiration, pluviométrie, nombre de jours de sécheresse, températures, etc.) sont utilisés pour tous les projets prospectifs dont le projet « Charente 2050 » et précisés fiche par fiche (*Documents - EPTB Charente, s. d.*).

De plus, dans le suivi du PGRE du bassin versant du Buëch, nous avons observé que le bureau d'étude ARTELIA a été mandaté pour définir un schéma de gestion et de sécurisation de l'irrigation sur ce bassin versant. Les gelées tardives / gelées noires sont mentionnées comme un indicateur climatique pour lequel il est important de connaître l'évolution dans les périodes futures (*ARTELIA, 2022*). Des gelées tardives ont un impact direct sur les cultures et aussi sur les besoins en eau qui diminuent lors des pertes par gel. Les volumes d'eau prélevés pour l'irrigation sont également un indicateur agronomique pertinent qui sert à étudier l'évolution des besoins en eau en temps réel, et à évaluer la pertinence des modèles qui modélisent cette donnée. Toutefois les modèles sont nécessaires pour simuler ces prélèvements sur des périodes futures.

3.3.3. D'autres indicateurs agro-climatiques en lien à la disponibilité en eau

Quand on regarde le projet « Life, Eau & Climat » qui vise à évaluer les effets du changement climatique pour mieux les intégrer dans la gestion locale des ressources en eau (*Stab & Lafont, 2023*), on constate également la mention d'indicateurs. Ceux liés aux débits sont bien sûr présents sur la fiche descriptive du projet, mais aussi des indicateurs liés à l'assèchement du sol et /ou à l'incapacité de ceux-ci à accueillir des cultures (Evapotranspiration ETP, Températures chaudes, *Soil wetness index* SWI, le déficit hydrique et les précipitations). Ces indicateurs de base peuvent également être utilisés pour mesurer le lien entre le changement climatique sur la (sur)exploitation des ressources, comme de la hausse des prix et les tensions d'usage. Mais l'impact sur les besoins en eau des cultures reste difficilement quantifiable avec ces indicateurs. L'étude mentionne également les indicateurs climatiques disponibles sur la plateforme DRIAS⁴ servant à décrire les variations liées au changement climatique.

⁴ Lien d'accès à la plateforme : [DRIAS](#)

Ce sont les suivants : différents indicateurs sur les températures et l'amplitude thermique, les extrêmes chauds et froids par jour et le nombre de jours extrêmes, les nombres de jours de gel et associés, nombre de nuits tropicales, les degrés jours, les nombres de jours de pluie consécutifs ou non, les précipitations, et les périodes de sécheresse⁵.

Le *Guide sur la gestion de l'eau et des technologies numériques en agriculture* mentionne l'importance de l'ETP dans le bilan hydrique d'une parcelle (*Les outils numériques pour la gestion de l'eau en agriculture, 2023*). Le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration maximale ETR/ETM permet d'exprimer le confort hydrique de la plante pendant sa période de production (floraison et maturation principalement). D'ailleurs, l'étude de la pénologie de la plante a son importance. L'ETP dépend du coefficient cultural (Kc) qui représente l'influence du feuillage, mais il est mentionné l'utilité de l'étude de la durée des stades phénologiques et le positionnement calendaire par rapport à la demande climatique, car les besoins en eau peuvent varier selon la date et les conditions du moment. De plus, ces indicateurs vont évoluer avec l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Le calcul de Kc, et du bilan hydrique ainsi que d'indicateurs comme la satisfaction hydrique de la vigne ou la fraction d'eau disponible et transpirable pour la vigne, est fait par le modèle Walis.

Un des rapports du projet « Explore 2070 » (Robin et al., 2023) nomme d'autres indicateurs climatiques pour l'étude de l'impact du changement climatique. On peut y voir l'évolution de l'humidité relative du sol et de l'air, de l'humidité spécifique, du vent moyen, du rayonnement incident visible et infrarouge et les jours d'enneigement. D'autre part, Sauquet et al., 2019, mentionnent dans leur rapport sur l'élaboration de nouvelles projections hydro-climatiques pour les stratégies d'adaptation au changement climatique, des indicateurs que les acteurs locaux voudraient voir apparaître dans leur PTGE dans le cadre du projet « Explore 2070 ». On parle ici de pluies extrêmes, d'évènements chauds ou froids extrêmes, d'indicateurs sur l'évapotranspiration, d'enneigement, de variations de la phénologie des cultures et d'évolution des saisons.

3.4. Bilan

3.4.1. Des inconnues concernant l'élaboration de scénarios prospectifs dans le cadre des PTGE.

Un tableau récapitulatif (Tableau 10 de l'Annexe 3 : Illustrations) recense les informations collectées dans la partie 3.

La première conclusion de cette « méta-analyse » est la difficulté que nous avons eu à trouver des données concernant les scénarios qui seront investigués dans le cadre des PTGE, ceux-ci étant actuellement en cours d'élaboration. Les autres études prospectives nous éclairent néanmoins sur les scénarios qui peuvent être investigués par les acteurs des territoires. Ces projets nous permettent de mieux comprendre l'impact que pourrait avoir le choix de laisser-faire, ainsi que l'impact de scénarios où des solutions sont trouvés collectivement. Plus spécifiquement, nous avons observé des données chiffrées montrant que le choix de faire varier l'assolement d'un bassin versant vers des cultures moins gourmandes en eau est une mesure qui permet d'économiser de l'eau. Quelques PTGE s'inspirent donc de ces études pour la création de scénarios, comme il est recommandé par le guide d'élaboration des PTGE.

⁵ Liste complète des indicateurs DRIAS sur le lien [suivant](#).

3.4.2. Des éléments à investiguer plus en détail pour consolider la construction de scénarios prospectifs

Pour la construction de scénarios, il est assez clair que les analyses sur les volumes prélevables et les DOE sont robustes et leur évolution est connue. Par contre, il est encore nécessaire de trouver des outils, modèles et indicateurs simples et pertinents afin de réaliser des diagnostics sur l'évolution des besoins en eau pour l'irrigation des cultures et qui permettront en définitive de diminuer la difficulté des acteurs à réaliser des scénarios sur le long terme. De façon générale, beaucoup de données doivent être approximées pour modéliser l'entièreté d'un bassin versant, et la précision peut être difficile à obtenir.

3.4.3. Des indicateurs agro et éco climatiques manquants.

En particulier nous n'avons pas trouvé beaucoup de projets ayant cherché à modéliser et calculer des indicateurs pertinents pour quantifier et qualifier les impacts du changement climatique. Des indicateurs climatiques sont souvent utilisés pour caractériser l'évolution du climat dans des horizons futurs et parfois des projets prospectifs utilisent des indicateurs pour connaître l'impact de celui-ci sur les cultures. Mais dans le cadre des PTGE, nous n'avons pas eu accès à plus de détails. Toutefois, nous avons constaté que les acteurs locaux et en particulier les agriculteurs sont intéressés par des indicateurs qui pourraient décrire l'impact de l'évolution de conditions thermiques et hydriques extrêmes, ainsi que de l'évolution de la phénologie des cultures.

4. L'UTILISATION DE MODÈLES DE CULTURE POUR ESTIMER LES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION

L'objectif de cette partie est d'évaluer la pertinence des modèles, leur facilité d'utilisation, et leur possible emploi dans le volet prospectif des PTGE en lien à l'étude de l'évolution des besoins en eau des cultures.

Pour cela, avons testé différents modèles pour évaluer les besoins en eau d'irrigation de différentes cultures sur deux sites d'étude. Nous avons comparé les sorties des modèles aux données connues des deux sites d'études pour des années passées avant de nous intéresser à la période actuelle (2000-2023), puis à des horizons futurs (horizon proche : 2020-2050, horizon moyen : 2050-2070 horizon lointain : 2070-2100). Le choix de ces horizons a pour objectif d'analyser l'évolution des besoins en eau d'irrigation à court, moyen et long terme. Cet exercice est nécessaire dans la prospective pour répondre d'une part aux questionnements des acteurs locaux qui cherchent à connaître l'évolution des cultures à court terme, et d'autre part aux questionnements sur le devenir de nos territoires sur le long terme avec le changement climatique.

4.1. Comparaison préalable des différents modèles

Nous avons d'abord choisi les modèles à évaluer parmi les possibilités variées (partie 3.2.3). Le choix a été guidé, d'une part, par l'analyse approfondie des modèles utilisés en prospective (état de l'art), mais aussi après la mention de l'utilisation de ces modèles par des membres et scientifiques de la chaire EACC. Optirrig en particulier, est un modèle développé par l'UMR G-eau et a donc également fait partie de cette étude. Nous avons décidé de comparer ces modèles avant d'obtenir des résultats de modélisation sur les besoins en eau des cultures. Cette comparaison est observable dans le tableau suivant :

Modèle	Principe	Sorties utiles des modèles	Caractéristiques qui varient entre les modèles	Cultures modélisables
Aqua Crop (FAO)	Modèle qui simule le rendement réalisable des cultures herbacées en fonction de la consommation d'eau.	<ul style="list-style-type: none"> - Besoins en eau d'irrigation - La surface foliaire - Le rendement - Les stress imposés aux cultures - Productivité de l'eau - Bilan hydrique 	Interface simple, permet de faire des approximations en cas de manque de données. Le modèle prend en compte la variation de [CO2] et d'autres variables liées changement climatique.	Orge, coton, haricot sec, maïs, riz paddy, pomme de terre, quinoa, sorgho, soja, betterave à sucre, canne à sucre, tournesol, tef, tomate, blé
Stics (INRAE)	Modèle générique et robuste permettant de simuler le système sol atmosphère-culture. Il simule la croissance des cultures ainsi que les bilans hydriques et azotés du sol en fonction des données climatiques quotidiennes	<ul style="list-style-type: none"> - Bilan hydrique complet - Le LAI - Le rendement - Productivité de l'eau - Besoins en eau d'irrigation 	Modèle robuste, complexe. Peut modéliser plusieurs cultures et les rotations. Le modèle prend en compte la variation de [CO2] et d'autres variables liées changement climatique. On peut faire varier la phénologie des plantes selon des données réelles de terrain. Prends en compte les cultures intercalaires.	Fétuque, herbe, miscanthus, fléole des prés, canne à sucre, orge de printemps, orge d'hiver, sorgho, blé d'hiver, blé dur, luzerne, riz, soja, pois de printemps, fraise, laitue, tomate, betterave sucrière, pomme de terre, curcuma, vigne, banane, lin, colza d'hiver, tournesol, moutarde, trèfle des prés, vesce, ray-grass, avoine à soies
Cropwat (FAO)	Permet de calculer les besoins en eau des cultures et les besoins en irrigation à partir de données sur le sol, le climat et les cultures	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoirs d'eau - Irrigation requise - Performance des cultures selon les conditions d'irrigation - Rendement 	Interface simple, permet d'avoir un calendrier d'irrigation et évaluer la performance des cultures selon les conditions d'irrigation. C'est utile dans le cas des grandes cultures. Le modèle fait varier la phénologie des cultures selon les températures.	Luzerne, artichaut, banane, orge, haricots, choux, agrumes, coton, dattier, céréales, raisin, herbe, arachides, maïs, mangue, millet, pâturage, poivre, pomme de terre, légumineuses, riz, sorgho, soja, sucre, canne à sucre, tournesol, melon, tabac, légumes, blé.
Walis (INRAE et IFV)	Calcule un bilan hydrique du sol en prenant en compte à la fois les données météorologiques du millésime et la dynamique de prélèvement en eau de la vigne, en lien avec le sol. Il simule chaque jour les entrées et les sorties en eau du sol.	<ul style="list-style-type: none"> - Bilan hydrique du sol - Conseils d'irrigation pour la vigne - Fraction d'eau disponible pour la vigne 	L'intérêt particulier de ce modèle est de pouvoir travailler sur la Vigne. Les variables climatiques affectent la phénologie de la vigne dans ce modèle. Le besoin en irrigation net n'est pas modélisable simplement et rend difficile l'utilisation du programme.	Vigne
Optirrig (UMR G-eau)	Vise à la génération, l'analyse et l'optimisation de scénarios d'irrigation des cultures. Il s'appuie sur une description simplifiée de la croissance des plantes en fonction de l'évolution des ressources en eau et en azote du sol, pour des objectifs opérationnels à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation ou du territoire.	<ul style="list-style-type: none"> - Données d'irrigation - LAI - Données financières - Matière sèche / biomasse - Drainage - profondeur des réservoirs d'eau 	Optirrig permet d'introduire des données d'entrée très exhaustives. Il est de façon générale assez maniable. Le modèle permet de trouver une bonne stratégie d'irrigation pour chaque culture.	Il est possible de créer un fichier de culture au choix.

Tableau 1 : Comparaison des principes de chaque outil de modélisation étudié ainsi que de leurs principales caractéristiques.

Les modèles choisis pour simuler les besoins optimaux en eau des cultures ont été choisis de façon à couvrir différents degrés de complexité et pour réaliser différents calculs comme l'impact de certaines pratiques agricoles sur le bilan hydrique de la parcelle. Le modèle **Cropwat** est un modèle de culture simple, avec une interface qui permet de passer rapidement des données d'entrées à un résultat sur les besoins en eau d'irrigation. Il ne va pas prendre en compte la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, l'effet de stress thermiques et hydriques trop élevés ou encore le décalage des stades phénologiques dus aux fortes chaleurs et à l'augmentation des degrés jours. Dans le même spectre, **WaLIS** modélise le bilan hydrique à l'échelle parcellaire pour la culture de vigne uniquement.

Inversement, **STICS** permet de travailler sur les rotations, les associations de cultures, l'effet de certaines pratiques agricoles sur la RU des sols. Il prend en compte le changement climatique de plusieurs façons, et implique d'avoir des bases agronomiques solides pour comprendre le fonctionnement.

Entre les deux, **Aquacrop** et **Optirrig** proposent moins de paramétrages initiaux et moins de résultats possibles mais permettent néanmoins de prendre en compte des détails dont la concentration de CO₂ dans l'atmosphère pour STICS. Ces modèles moins complexes sont à première vue adaptés à la réalisation rapide de bilans sur les besoins en eau d'irrigation des cultures sur des horizons futurs. Aquacrop n'est pas capable de modéliser autant de cultures que STICS et est initialement spécialisé dans les grandes cultures, malgré la possibilité aujourd'hui de modéliser en plus le maraîchage.

4.2. L'utilisation des modèles sur des zones d'étude spécifiques

4.2.1. Des zones d'étude permettant de décrire le bassin méditerranéen

4.2.1.1. Une première zone d'étude en Haute-Provence

Les différents modèles ont été testés sur deux zones d'étude représentatives du bassin méditerranéen.

La première zone d'étude traverse trois sous-bassins versant : celui de l'Asse, du Largue et du Calavon. Plus spécifiquement, nous nous intéressons à la zone géographique en jaune ci-dessous pour laquelle n'ont été retenues que les exploitations dites « cibles » qui ont recourt à l'irrigation. Le choix de ces exploitations par la chambre d'agriculture des Alpes de Haute-Provence s'est fait sur plusieurs critères :

- Les surfaces en grandes cultures et maraîchage irriguées sont « significatives » dans le territoire de travail (c'est-à-dire qu'elles représentent une SAU autour de 100 hectares).
- Des exploitations qui sont connues car on dispose de données sur l'assolement des différentes années, de données sur les pratiques et itinéraires techniques, etc.
- Certaines exploitations ont été choisies car intéressantes et potentiellement mobilisables pour le projet.

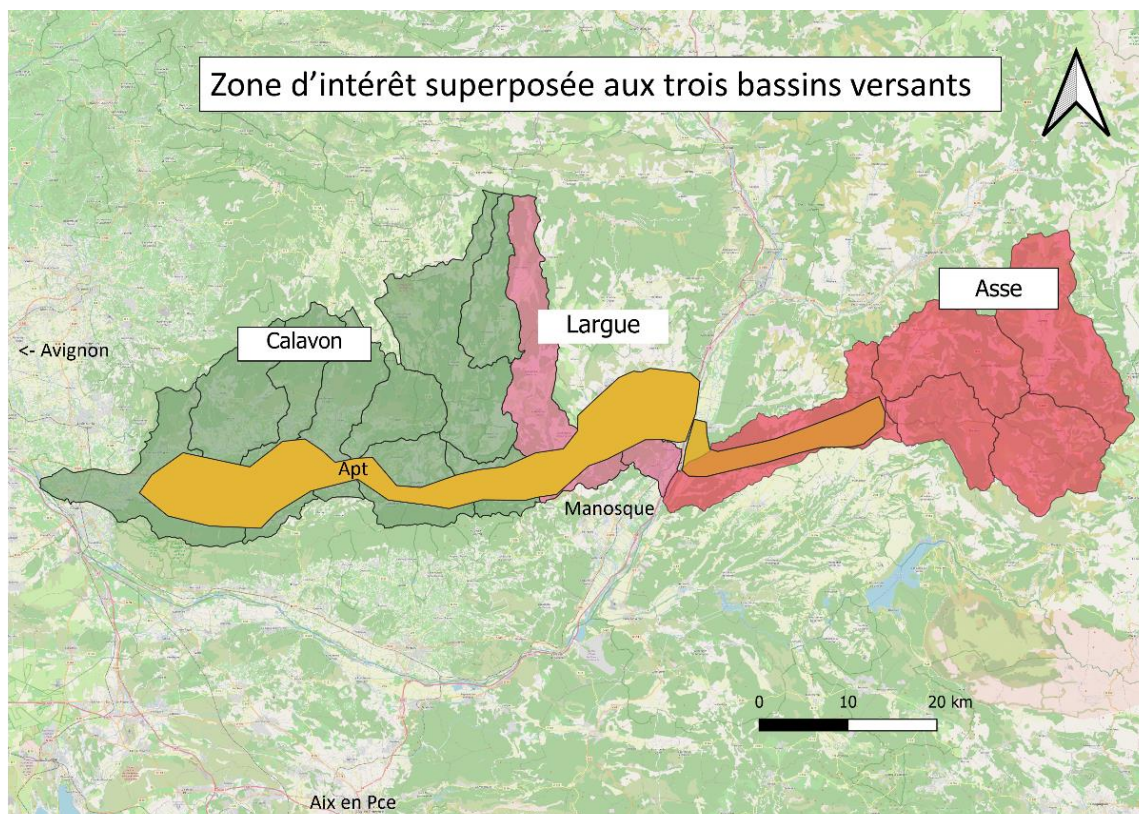


Figure 1 : Zone d'étude superposée aux bassins versants de l'Asse, Calavon et Largue dans le département des Alpes de Haute Provence

- Zone d'étude répartie sur les trois sous-bassins versants.
- Sous-bassin versant de l'Asse
- Sous-bassin versant de Calavon
- Sous-bassin versant de Largue

4.2.1.1.1. Focus sur le bassin versant de l'Asse

Le bassin-versant de l'Asse est intéressant en raison de la présence d'arboriculture, de maraîchage, mais aussi à la présence de grandes cultures et semences (maïs, betterave, orge, tournesol, etc.) et de plantes aromatiques à parfum et médicinales (PAPAM). Voici l'assolement des exploitations cibles sur le bassin versant de l'Asse donné par le projet :

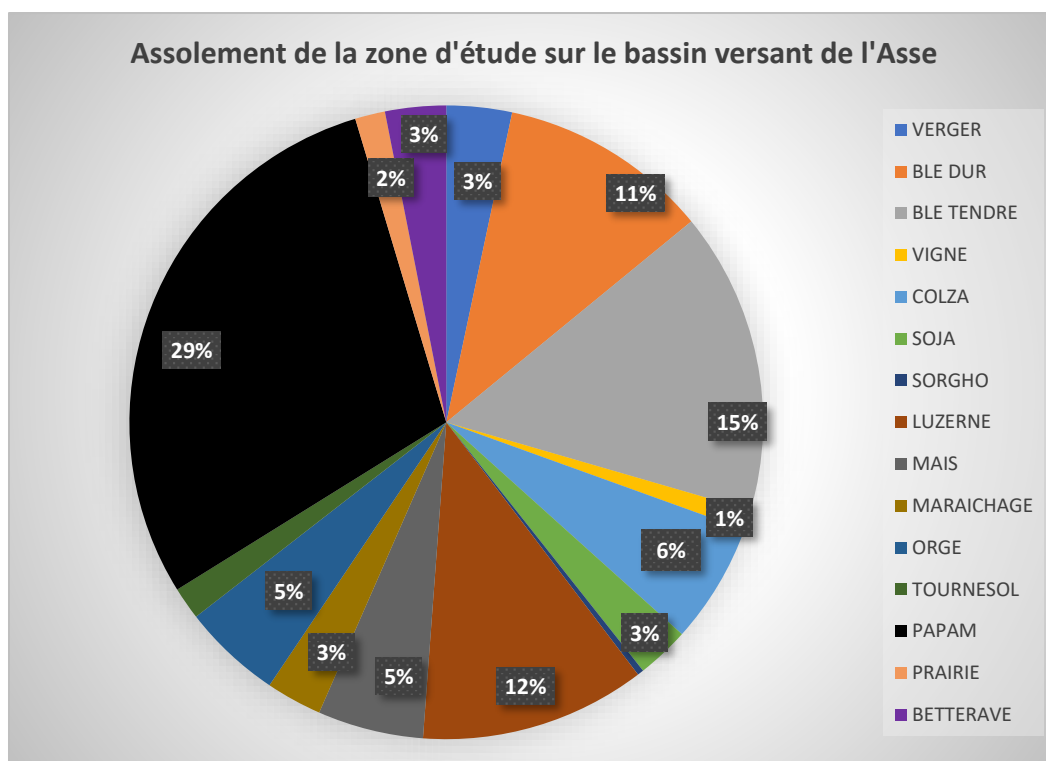


Figure 2 : Assolement des parcelles cibles dans la zone d'étude de l'Asse (Source : Chambre d'agriculture Alpes de Haute-Provence, 2023).

Pour simplifier la modélisation, nous avons fait le choix de reclasser certaines cultures dans plusieurs catégories pour faciliter la modélisation. Les modèles de culture ne sont pas en capacité de modéliser toutes les cultures d'un bassin versant, en particulier la majorité des cultures pérennes, de l'arboriculture, ou les cultures moins communes comme les aromatiques. Pour réduire le temps de travail et faciliter la modélisation, nous avons donc regroupé les cultures en fonction de la capacité des modèles à simuler la croissance des cultures et en fonction de leur nature. Ainsi, les « prairies temporaires », « permanentes » ont été regroupées dans la même classe (« prairie »). Parmi les « céréales » ont été modélisés le blé tendre, blé dur, maïs et autres cultures sur lesquelles il est possible de travailler avec les modèles, et les légumineuses ont été regroupées dans une catégorie « soja » ou « luzerne » selon leur besoin en eau d'irrigation, les cultures maraîchères ont été regroupées et modélisées par la tomate dans les modèles, et les vergers par le pommier pas toujours modélisable en fonction des modèles.

4.2.1.1.2. Focus sur les bassins versants du Calavon et du Largue

La zone d'étude localisée sur ce bassin versant est représentée majoritairement par des grandes cultures, mais avec plus de vergers et moins de PAPAM. La présence de cultures pérennes (pommier, vigne) et de maraîchage plein champ (melon, courge) est également intéressante sur ce territoire qui est très diversifié.

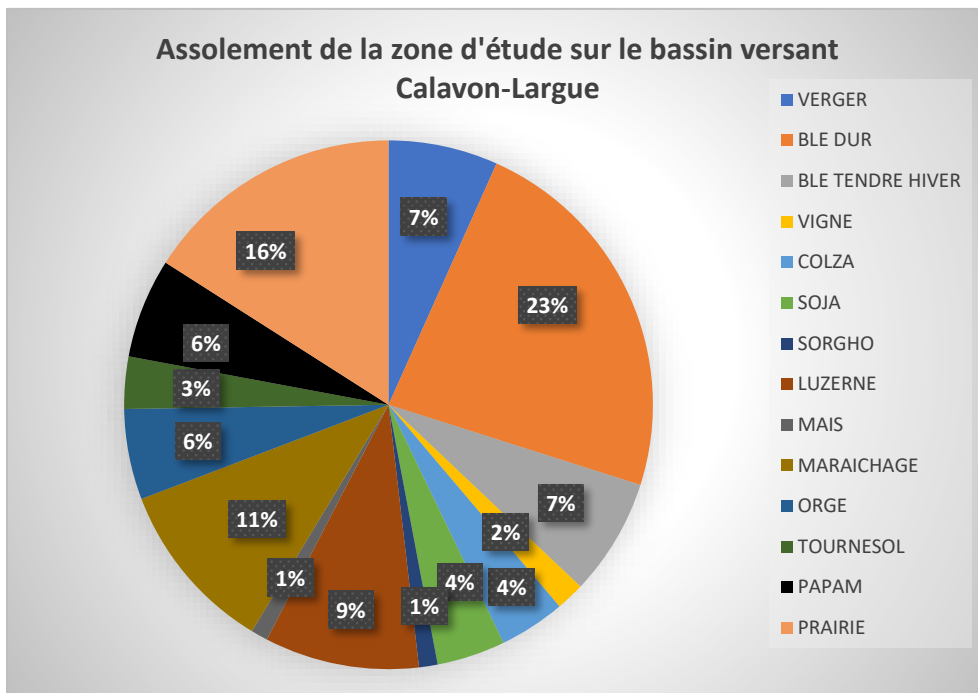


Figure 3 : Assolement des parcelles cibles dans la zone d'étude de l'Asse après simplification.

4.2.1.2. Une seconde zone d'étude s'étendant sur les départements de l'Aude, l'Hérault et le Gard

Cette seconde zone d'étude est intéressante car elle est principalement composée de vignobles, contrairement aux Alpes de Haute-Provence. Une description plus complète de la région méditerranéenne française est donc possible en étudiant ce territoire. Nous nous sommes intéressés aux zones pour lesquelles BRLi possède des données mesurées de prélèvements à des bornes du réseau hydraulique régional (RHR).

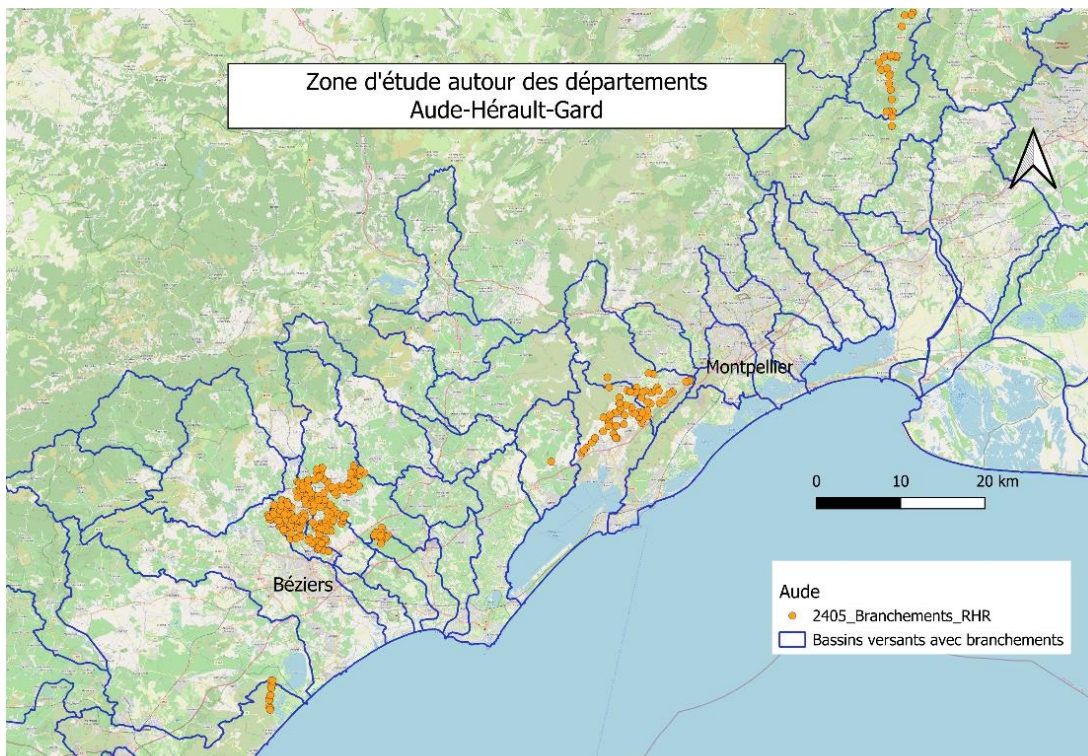


Figure 4 : Branchements des bornes de prélèvements d'eau pour l'irrigation sur le réseau hydraulique régional (RHR) (Source : données partagées par BRLi)

Nous avons utilisé les données disponibles pour caractériser l'assolement de la zone d'étude sur le graphique suivant :

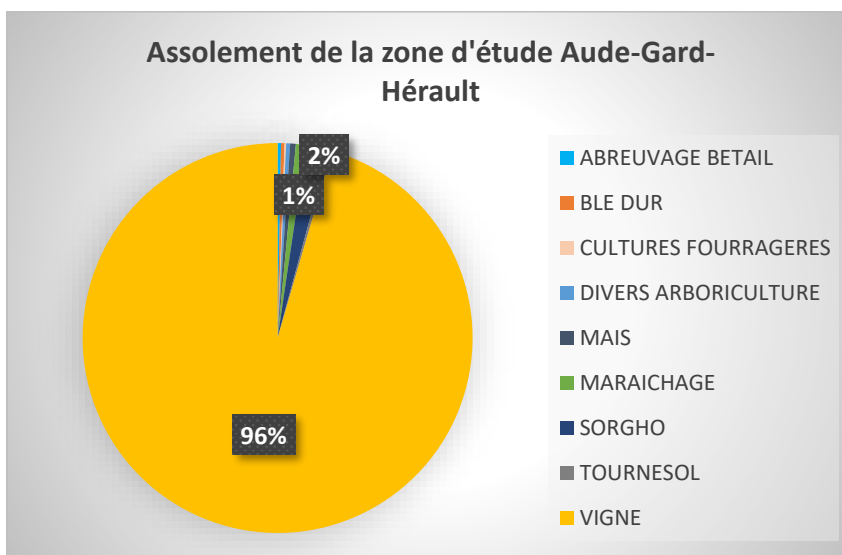


Figure 5 : L'assolement de la zone d'étude sur les trois départements Aude-Hérault-Gard (Source : données BRLi).

4.2.1.3. Les données de consommation en eau sur les deux zones d'étude

Des données sur les prélèvements en eau pour l'irrigation sont disponibles sur la zone d'étude Aude-Gard-Hérault comme dit précédemment. Les prélèvements des compteurs nous ont été partagés par BRLi. Pour les Alpes de Haute-Provence, des données de prélèvements nous ont été confiés également pour les parcelles cibles dans le bassin versant de l'Asse et Calavon-Largue par la chambre d'agriculture

des Alpes de Haute-Provence (CA04). Ces données sont essentielles à la première étape de la modélisation qui consiste à comparer les sorties des modèles avec les données réelles. Elles permettent de voir si les ordres de grandeur modélisés sont semblables.

Les données de sol dont nous aurons besoin pour modéliser les bassins versants sont disponibles via la plateforme « GisSol ». Une approximation de la réserve utile (RU) sur l'ensemble de l'hexagone a été faite sur cette plateforme⁶ (*Gis Sol » Les Réserves En Eau Utile de La France Métropolitaine*, s. d.).

Le tableau suivant fait le bilan des données mobilisées pour le projet :

Zone d'étude	Données	Source	Commentaire
Haute-Provence	RPG (2023)	Données publiques	Couches au format .shp
	Parcelles / exploitations cibles	CA04	Couches au format .shp, pour l'année 2023
	Référentiel des besoins en eau d'irrigation	CA83	Données pour une année sèche et une année médiane (sans précisions)
	Prélèvements prévisionnels (2019-2024)	CA04	Seulement pour le bassin de l'Asse pour l'instant
Aude-Hérault-Gard	Prélèvements réels d'eau d'irrigation (2019-2024)	CA04	Données mensuelles, seulement pour l'Asse pour l'instant
	Prélèvements d'eau pour l'irrigation sur le réseau hydraulique régional (RHR)	BRLi	Années 2015 à 2022
Les deux zones d'étude	RPG Données sol (RU)	Données publiques Plateforme GisSol	Réserve utile seulement, données grossières.

Tableau 2 : Bilan des données sur les besoins en eau d'irrigation, les prélèvements en eau et sur la description des territoires disponibles pour les deux zones d'étude

Zone d'étude	Données	Source	Commentaire
Haute-Provence	ETP, Températures, vents, rayonnement, ensoleillement, [CO2], précipitations, humidité	Portail DRIAS (2020-2100)	Points de la maille : 4817; 4964; 4968, RCP 4.5 et 8.5
		Météo-France (1960-2023)	Stations : Manosque, Dauphin, Valensole, Forcalquier
Aude-Hérault-Gard		Portail DRIAS (2020-2100)	Points de la maille : 3795; 4086; 4661 RCP 4.5 et 8.5
		Météo-France (1960-2023)	Stations : Roujan INRAE, Pézenas-Tourbes, Montpellier, Villeneuve-lès-Maguelone

Tableau 3 : Bilan des données climatiques disponibles sur deux zones d'étude.

Nous avons fait le choix de travailler avec les deux scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 issus des travaux prospectifs du GIEC. Ces deux scénarios simulent respectivement une trajectoire de stabilisation sans dépassement et une trajectoire croissante des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Moss et al., 2010). Ces scénarios sont employés de façon récurrente dans les études prospectives. Parmi le choix

⁶ Les données sont en [libre accès](#)

des chaînes de modélisation, nous choisissons de modéliser les horizons futurs avec des données climatiques entre les années 2020 et 2100 issues du portail [DRIAS](#). Plus précisément, le modèle climatique régional utilisé est ALADIN63 et le modèle global est le CNRM-CM5-LR. Ces modèles français fournissent toutes les données nécessaires à l'utilisation des modèles et nous paraissent en adéquation avec les objectifs de ce projet. Les données sont en libre accès et sous le même format pour tout le territoire français, et permettent de paramétrer quasiment toutes les entrées climatiques des modèles. Nous choisissons de faire confiance à ces données issues de relevés de Météo-France.

4.2.2. La méthodologie de modélisation utilisée pour estimer les besoins en eau avec les modèles de culture

Chaque modèle de culture possède un mode de fonctionnement différent. En revanche, les résultats que nous cherchons à obtenir sont semblables. Voici donc une méthodologie standard d'utilisation des différents modèles de culture avec les hypothèses et simplifications que nous avons choisies pour obtenir les besoins en eau d'irrigation des cultures.

a) Entrées des modèles :

- **Cultures** : c'est l'assolement des zones d'étude simplifié obtenu sur les figures 3 et 5. Des cultures types sont choisies pour modéliser le territoire : blé, sorgho, orge, maïs, tournesol, soja, betterave, tomate, vigne, une culture pour les prairies et la pomme. Cela constitue une simplification, en prenant par exemple la tomate pour représenter le maraîchage, la pomme pour les vergers, et ainsi de suite par catégorie de cultures.
- **Sol** : les données utilisées sont en premier temps celles de **Gis-sol**. Nous faisons une simplification en considérant qu'il n'y a pas de nappe sous-jacente sur les terrains d'étude et que les sols représentés sont des sols à l'équilibre de profondeur moyenne (1 à 2 mètres) avec la RU correspondante à celle des données ci-dessus.
- **Climat** : des données Météo France sont téléchargées, et les variables climatiques (pluviométrie, ETP, etc.) sont extraites en prenant les moyennes entre les stations aux alentours de la zone d'étude. Pour les données climatiques sur les années 2020-2100, nous utilisons des données climatiques de la base de données DRIAS. Selon le bassin versant étudié, plusieurs stations météo sont prises en compte selon la précision des données fournies. Parfois les données climatiques d'intérêt ne sont pas disponibles et il faut se fier aux stations météo plus lointaines.
- **Pratiques culturales** : selon les données disponibles, et selon la complexité des modèles, on peut choisir d'intégrer ou non les pratiques culturales. La CA04 nous a fourni des données de pratiques culturales qui peuvent parfois être intégrées dans les modèles. Il est également possible de simuler d'autres pratiques culturales pour étudier l'impact de celles-ci sur la variation de la réserve utile des sols, de l'infiltration et donc des besoins en irrigation.
- **Données d'irrigation** : on suppose que le calendrier d'irrigation est un calendrier idéal modélisant l'irrigation nette maximale (l'irrigation optimale) requise par les cultures. Celle-ci est déterminée différemment selon les modèles, en prenant en compte un seuil de disponibilité en eau qui, une fois franchi, déclenche l'irrigation. C'est une simulation de cultures menées à l'optimum, malgré le fait que ce ne soit pas toujours l'objectif (exemple de la vigne).

b) Modélisation et sortie des modèles :

- Les données d'entrée servent à paramétrer les zones d'études qui vont être modélisées.
- Les sorties que nous prenons en compte sont principalement les volumes d'eau attribués à l'irrigation, mais aussi les autres variables du bilan hydrique (ETP, ruissellement, infiltration en profondeur, pluviométrie) et le rendement. Elles sont donc obtenues pour une culture, un sol, un climat et des pratiques culturales données.

- Connaissant les besoins en eau à l'échelle d'une parcelle / exploitation, on utilise l'assolement simplifié d'un bassin versant et on calcule les besoins en eau pour l'irrigation sur l'ensemble des parcelles étudiées du bassin versant. Un exemple de sortie de modèle est observable sur la figure 27 de l'annexe 3.

c) *Comparaison à des données réelles de prélèvements en eau pour l'irrigation :*

Pour évaluer les besoins modélisés, il faut les comparer avec les données de prélèvements réels, c'est-à-dire les prélèvements à la borne données par BRLi ou la CA04. Une option est de prendre la totalité des besoins en eau réels pour l'irrigation sur l'ensemble d'une zone d'étude, qui s'obtient en sommant les prélèvements réels à chaque borne sur ce territoire. On peut ensuite comparer cette donnée avec le besoin en eau modélisé et extrapolé sur l'ensemble de la zone d'étude avec l'assolement des cultures types défini précédemment.

Une autre approche est possible : les données de prélèvements viennent avec la culture associée à chaque borne (c'est le cas pour les données fournies par BRLi), ce qui permet de connaître à quelle culture est attribuée l'eau prélevée. On pourrait donc chercher à estimer les besoins en eau d'irrigation de la vigne sur le territoire d'étude (par exemple) et des autres cultures. Cette approche pourrait être intéressante dans le territoire de l'Aude où les données contiennent la surface des parcelles et détaillent les bornes qui permettent d'irriguer de la vigne. Dans ce cas, une simplification que nous faisons concerne quelques bornes distribuant de l'eau à des cultures variées (carotte, maïs, sorgho...). Dans ce cas, il faudrait faire un choix de simplification avec cette approche et associer cette borne à un seul type de culture pour faciliter la modélisation.

d) *Choix des périodes de modélisation.*

Pour modéliser la période de référence et les horizons futurs, on considère que chacune de ces périodes peut être caractérisée par une année décennale sèche, une année décennale humide et une année médiane. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur le déficit hydrique défini par la différence entre les précipitations et l'ETP calculé avec les données issues des portails météo (DRIAS et Météo-France) sur les mois de mai, juin, juillet et août. Un rang est attribué à chaque année après les avoir triés par ordre croissant de déficit, et la fréquence empirique de Hazen est ensuite calculée pour chaque année.

$$f_{Hazen} = \frac{r - 0,5}{n}$$

- « n » étant le total d'années de l'échantillon (n = 24 pour la période 2000-2023 par exemple)
- « r » étant le rang

Il est ensuite possible de réaliser un ajustement de Galton sur la série f_{Hazen} , représenter graphiquement le déficit en fonction de f, et en tirer le décile correspondant à une fréquence de non dépassement de 1/10 par exemple⁷ (*Hydrologie générale : Analyse fréquentielle, s. d.*). Les valeurs décennales et les années correspondantes sont fournies dans le tableau suivant :

Zone d'étude	RCP	Horizon	Année sèche	Année médiane	Année humide
Aude-Hérault-Gard		2020-2050	2043	2046	2038
Aude-Hérault-Gard	4.5	2050-2070	2066	2058	2052
Aude-Hérault-Gard		2070-2100	2091	2082	2073
Aude-Hérault-Gard	8.5	2020-2050	2042	2047	2029
Aude-Hérault-Gard		2020-2050	2065	2057	2050

⁷ La méthode est précisée sur le lien [suivant](#)

Aude-Hérault-Gard		2020-2050	2095	2091	2097
Haute-Provence		2020-2050	2042	2043	2031
Haute-Provence	8.5	2020-2050	2058	2064	2050
Haute-Provence		2020-2050	2090	2081	2079
Haute-Provence		2020-2050	2043	2033	2031
Haute-Provence	4.5	2020-2050	2064	2061	2069
Haute-Provence		2020-2050	2094	2090	2080
Aude-Hérault-Gard		Période actuelle	2022	2010	2018
Haute-Provence		Période actuelle	2022	2019	2023

Tableau 4 : Bilan des années décennales sur l'ensemble des périodes à modéliser.

4.2.3. Résultats de la modélisation

Chaque modèle est en capacité de simuler la croissance d'un certain nombre de cultures et de variétés. Nous avons utilisé ces modèles pour simuler les besoins en eau d'irrigation des cultures qui constituent l'assolement des deux zones d'étude, malgré le fait que certaines cultures ne peuvent pas être modélisées en fonction du modèle utilisé. Les périodes modélisées ont été la période de référence ainsi que les trois horizons futurs, et chaque horizon est modélisé deux fois en fonction du choix du scénario climatique (RCP 4.5 ou RCP 8.5). Un grand ensemble de modélisation ont donc été réalisés pour finalement obtenir des résultats sur les deux zones d'études, sur les quatre périodes, avec les différents modèles de culture, sur les deux RCP, et sur l'ensemble des cultures modélisables par chaque modèle. Les résultats disponibles majoritairement dans l'Annexe 3 : Illustrations sont en partie sélectionnés dans la partie suivante pour observer les tendances, et comparer à des données réelles de prélèvements en eau pour l'irrigation. L'ensemble des résultats de modélisation et de calcul d'indicateurs sera disponible dans un autre livrable différent de ce rapport.

4.2.3.1. Le modèle WaLIS, un modèle inutilisable pour estimer les besoins en eau

Le modèle WaLIS a été utilisé pour simuler le bilan hydrique de parcelles de vigne dans la zone d'étude du sous bassin versant de l'Asse et de la zone d'étude Aude-Hérault-Gard. Malheureusement, ce modèle disponible en ligne ne fournit pas de simulations sur le rendement de la vigne. Et surtout, il n'y a pas d'option en entrée du modèle lui permettant de simuler un calendrier d'irrigation optimal où la culture est irriguée dès qu'un seuil de stress hydrique est franchi. Pour modéliser ces besoins optimaux en eau avec WaLIS, il faudrait donc créer plusieurs scénarios ou calendriers d'irrigation qui sont paramétrables en entrée du modèle, et ensuite observer l'évolution des indicateurs de stress pour essayer de se caler et trouver un calendrier précis qui serait optimal. Cette démarche étant longue, manuelle et surtout différente pour chaque jeu de données climatiques, nous avons décidé que WaLIS n'est pas un outil pertinent pour la modélisation des besoins en eau d'irrigation dans le cadre de nos objectifs.

4.2.3.2. Comparaison des résultats émis obtenus avec les différents modèles

Le tableau suivant présente les résultats de besoins optimaux en eau d'irrigation pour les cultures modélisables par les outils Aquacrop ou Cropwat sur le sous-bassin versant de l'Asse.

ANNEE : Besoin en eau (mm) par culture	2019(médiane)	2022(sèche)	2023(humide)	2019(médiane)	2022(sèche)	2023(humide)
	Aquacrop			Cropwat		
BETTERAVE	437	626.2	396	610	713.2	543
BLE DUR	634	747	558	223	338	145

BLE DUR HIVER				704	780	704
LUZERNE				134	196	179
MAIS	433	400.4	409	438	413	474
MARAICHAGE	316	439	234	491	678	442
ORGE PRINTEMPS	83	151.1	106.8	239	353	166
SOJA	347	530	302	369	485	342
SORGHO	136	287	90	408.2	507.2	359
TOURNESOL	213.9	457	295	408	573	338

*Tableau 5: Besoins optimaux en eau simulée avec les modèles **Aquacrop** et **Cropwat** sur la période 2003-2023 pour le bassin versant de l'Asse pour différentes cultures*

Les tendances sont semblables entre les modèles sauf pour quelques exceptions où les besoins en eau sont plus élevés sur une année médiane qu'une année sèche, sans compter les valeurs obtenues pour le blé dur avec Aquacrop qui semblent aberrantes par rapport à des valeurs communes (Besoins en eau, 2024). Les dates de semis et de récolte choisies pour la paramétrisation des modèles sont illustrées dans le Tableau 11 de l'annexe 3. Ces données sont issues de recherche bibliographique et / ou des paramètres prédéterminés des modèles de culture. Il est possible de changer la date de semis et observer l'impact sur les besoins en eau d'un cycle de culture plus précoce par exemple. Il est également possible d'utiliser (selon les modèles) le mode de simulation en degrés jours pour voir les effets du changement climatique sur les dates de récolte, le rendement et les besoins en eau d'irrigation.

Les résultats obtenus avec le modèle STICS (Tableau 12 de l'Annexe 3 : Illustrations) pour ces trois années sont plus difficilement interprétables. Il n'y a pas de tendance claire entre les années sèches, humides et médianes, et les écarts entre les résultats varient selon la culture modélisée. Les explications résident probablement dans le mode de calcul des indicateurs qui déclenchent l'irrigation automatique dans STICS.

Les résultats obtenus entre les modèles sont donc variables :

- L'amplitude médiane des résultats entre les trois modèles est de 189 mm pour 2019 avec un écart type de 122 mm
- 246,7 mm pour 2022 avec un écart type de 161 mm
- 200,6 mm pour 2023 avec un écart type de 113 mm

Les amplitudes augmentent sur des années extrêmes par rapport à l'année médiane. Les résultats entre modèles présentent d'ailleurs de plus grandes différences sur ces années.

En comparaison, les besoins en eau modélisés par Cropwat pour ces trois années sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard et les données de référence sur la région issues du référentiel d'irrigation BRLi (*Mémento irrigation agricole - BRL*, s. d.) se trouvent respectivement en Annexe 3 : Illustrations, figures 14 et 15.

4.2.3.3. Comparaison avec les données réelles de prélèvements d'eau pour l'irrigation

Premièrement, nous avons eu accès à des données de besoins en eau d'irrigation issues du référentiel⁸ de la région PACA (*Chambre d'agriculture Provence Alpes Côte d'azur, 2014*), décrivant les besoins en eau d'irrigation de certaines cultures types de la région pour une année sèche et médiane. Le tableau 13 en Annexe 3 : Illustrations montre les valeurs issues de la station de Manosque, pour une réserve utile

⁸<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://www.agrometeo.fr/fondoc/Livret%2520BD.pdf&ved=2ahUKewiepoKznsmlAxURdaQEHS2kJd8QFnoECBIQAQ&usq=AOvVaw1u72JUEhSJWZpmZjGE5uPO>

du sol de 60 mm/m. Ce sont les conditions qui se rapprochent le plus du sous-bassin versant de l'Asse et que nous utilisons donc pour la comparaison.

Les ordres de grandeurs sont souvent semblables à ceux proposés par les modèles de culture Aquacrop dans la partie 4.2.3.2 et présentent une plus grande variabilité que les résultats issus de Cropwat et STICS.

Ce référentiel est à prendre avec des pincettes car nous ne connaissons pas en profondeur la méthode utilisée pour déterminer les années sèches et médianes. Par ailleurs, il s'agit ici d'un ancien référentiel, nous obligeant à comparer des données de 2022 avec des données de 2014 ou antérieures.

Deuxièmement, nous avons comparé les données simulées avec les modèles de culture aux données de prélèvements réels qui nous ont été partagées par les partenaires. Nous avons accès aux assolements des zones d'étude. Ainsi, en faisant la somme des besoins en eau pour chaque culture modélisée, puis en multipliant par la surface totale de cette culture sur le bassin versant étudié, nous simulons les besoins en eau d'irrigation total du bassin versant. Si toutes les cultures ne sont malheureusement pas modélisables par chacun des modèles, nous pouvons malgré tout comparer les ordres de grandeur des résultats à l'échelle d'un bassin versant (en remplaçant les résultats des cultures non modélisables par des données issues du memento par exemple).

Pour l'irrigation sur le bassin versant de l'Asse, nous avons des données de prélèvements prévisionnels (associés à un type de culture, une variété, et à la surface irriguée) et des données réelles de prélèvements (relevées sur des compteurs donc non associés à des cultures). Les prélèvements prévisionnels sont très proches de la réalité selon la chambre, donc nous les utiliserons pour les comparer aux données issues de la modélisation. Le bassin versant de l'Asse étant parfois déficitaire, les volumes prévisionnels peuvent être en dessous des optimums modélisés, en partie à cause des interdictions.

Sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard, nous avons des données de prélèvements réels associés à des cultures et à une surface irriguée également ([Tableau 2](#)). Sur ces données, nous avons sommé l'ensemble des volumes prélevés pour estimer les besoins en eau d'irrigation à l'échelle des bassins versants.

Prélèvements réels d'eau (m3)			
	Année médiane (2019)	Année sèche (2022)	Année humide (2023)
Données réelles	1.189.623	1.063.458	1.120.724
Référentiel 2014	3.459.846	4.022.686	Pas de données
Aquacrop	3.270.636	3.886.339	3.033.526
STICS	3.083.904	3.219.776	3.533.813
Cropwat	3.392.278	3.912.489	3.303.711

Tableau 6 : Tableau comparatif entre les besoins en eau modélisés et « réels » à l'échelle du bassin versant de l'Asse

Sur l'ensemble du bassin, les besoins en eau d'irrigation réels sont divisés par plus de la moitié que les besoins modélisés avec Aquacrop (de même pour les autres modèles). Il est intéressant de noter que les données fournies sur les prélèvements autorisées ne correspondent pas exactement aux données de l'assolement du bassin versant de l'Asse décrit dans la partie 3.2.1.1. La surface totale de cet assolement est de 1290 ha alors que nous sommes aux alentours de 700 ha pour les données de prélèvements autorisées.

Les données sur les prélèvements prévisionnels sont détaillées culture par culture. Nous pouvons donc faire la comparaison avec nos résultats à l'échelle de la parcelle comme sur le tableau suivant :

Culture	Prélèvements prévisionnels (mm)		Aquacrop		Cropwat	
	Année médiane (2019)	Année sèche (2022)	Année médiane	Année sèche	Année médiane	Année sèche
Tournesol	140	140	213.9	474	408.2	573
Maïs	440	480	433	400.4	438	413

Soja	340	480	347	530	369	485
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tableau 7 : Tableau comparatif entre les besoins en eau modélisés et prévisionnels pour le bassin versant de l'Asse.

Pour ces trois cultures caractéristiques, les modèles estiment des besoins qui sont parfois proches des données de prélèvements, et parfois les modèles donnent des valeurs plus élevées pour le tournesol, atteignant jusqu'à plus du double des volumes prélevés autorisés. Les données issues de la modélisation sont quasiment toujours supérieures aux prélèvements prévisionnels, sauf encore pour le maïs.

Pour la zone d'étude Aude-Hérault-Gard, cette fois nous pouvons comparer les besoins réels en eau pour l'irrigation à l'échelle de la zone d'étude complète avec les besoins simulés par le modèle Cropwat :

Besoins en eau d'irrigation (mm)	2019	2022
Données de prélèvements réels	248492	284728
Cropwat	5036124	6482585

Tableau 8 : Besoins en eau d'irrigation réels et simulés par Cropwat sur une année médiane (2019) et une année sèche (2022) sur l'ensemble de zone d'étude Aude-Hérault-Gard

La vigne étant la principale composante de l'assolement de cette région d'étude, la différence entre les résultats dépend en grande partie des besoins simulés de la vigne. Le modèle WaLIS n'a pas été utile pour estimer les besoins en eau d'irrigation. C'est pourquoi nous avons utilisé Cropwat et STICS qui permettent de modéliser les besoins de la vigne, pour estimer les besoins optimaux en eau d'irrigation sur l'ensemble de la zone d'étude. Mais sur les résultats à l'échelle de la zone d'étude entière, nous voyons une différence de plus de vingt fois le volume estimé avec les modèles que sur les prélèvements réels.

Voici les besoins de la vigne estimés par STICS et Cropwat comparés avec les besoins réels sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard (prélèvements moyens par an) :

	Année : 2019	2022
Besoins en eau d'irrigation (mm)		
Données de prélèvements réels	122	135
Cropwat	242	279
STICS	832	955

Tableau 9 : Besoins en eau d'irrigation de la vigne réels et simulés par deux modèles de culture pour une année médiane (2019) et une année sèche (2022) sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard

STICS et Cropwat surestiment largement les besoins en eau de la vigne. Cela peut être une première explication pour la différence obtenue avec les besoins réels à l'échelle de la zone d'étude. On peut notamment quantifier l'impact de l'erreur de modélisation sur la culture de vigne : en rentrant des besoins de vigne proches des données réelles de prélèvements comme dans le tableau ci-dessus (122 et 135 mm pour 2019 et 2022 respectivement), nous obtenons une différence de besoins en eau d'irrigation à l'échelle de la zone d'étude dix fois supérieurs et non plus vingt fois supérieurs.

4.2.3.4. Résultats de l'évolution des besoins en eau sur différents scénarios climatiques

4.2.3.4.1. Focus sur le bassin versant de l'Asse.

Enfin, nous avons simulé avec les modèles de culture l'évolution des besoins en eau d'irrigation en fonction des deux RCP 4.5 et 8.5, chaque fois sur un horizon proche (2020-2050), moyen (2050-2070) et un horizon lointain (2070-2100).

Les résultats pour trois cultures types sont observables sur les figures suivantes :

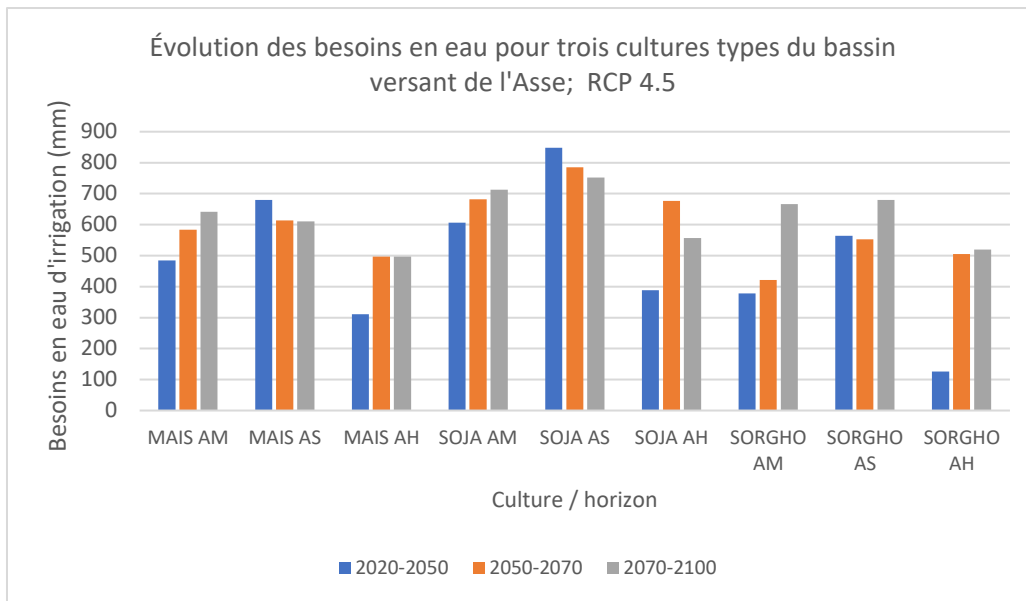


Figure 6 : Évolution des besoins en eau annuels modélisées avec Aquacrop pour le RCP 4.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur le bassin versant de l'Asse, pour des horizons proche, moyen et lointain.

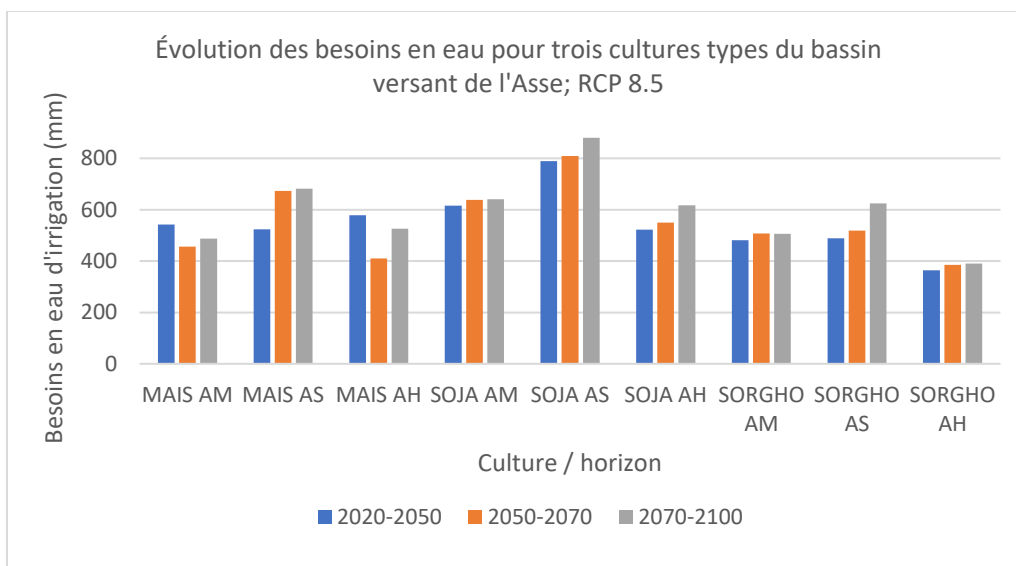


Figure 7 : Évolution des besoins en eau annuels modélisées avec Aquacrop pour le RCP 8.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur le bassin versant de l'Asse pour des horizons proche, moyen et lointain.

Ces figures permettent d'observer les tendances d'évolution des besoins en eau d'irrigation. On observe principalement une tendance à la hausse entre un horizon proche, puis un horizon moyen et un horizon lointain, qui ne peut toutefois pas être généralisée. Le maïs voit parfois ses besoins à la baisse entre les horizons proches et lointains.

Dans le cas de ces trois cultures, après la modélisation des années sèches, on observe à horizon proche une augmentation globale des besoins en eau d'irrigation de 62% dans le cas du RCP 4.5 et de 50% pour le RCP 8.5. À horizon moyen, il y a une augmentation globale des besoins de 64% pour le RCP 4.5, 67% pour le RCP 8.5. Et à horizon lointain, on calcule une augmentation globale des besoins de 77% pour RCP 4.5, 84% pour RCP 8.5.

4.2.3.4.2. Focus sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard

En comparaison, voici les résultats de la modélisation de ces besoins pour les cultures de maïs et de sorgho sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard (le soja n'étant pas cultivé dans cette région) :

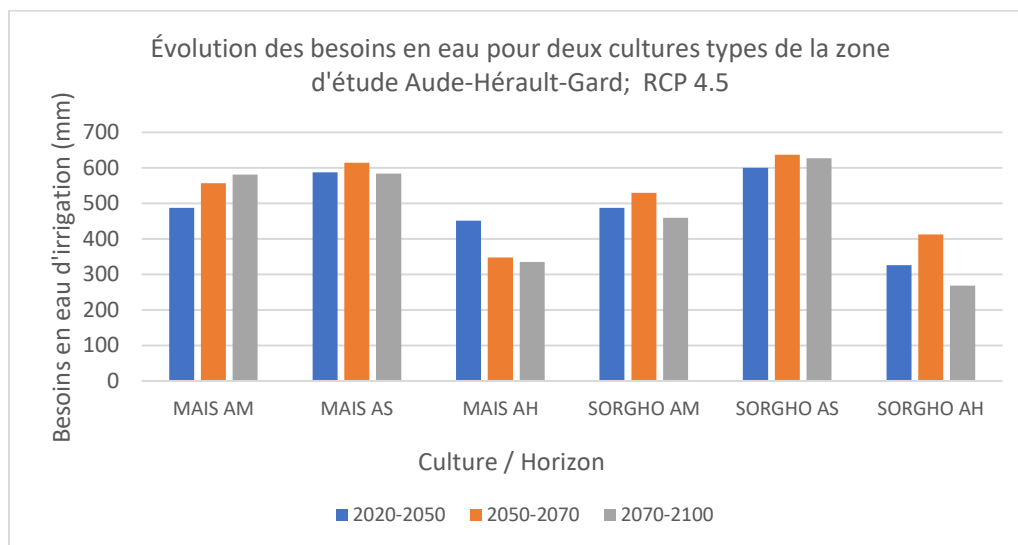


Figure 8 : Évolution des besoins en eau modélisées avec Aquacrop pour le RCP 4.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard, pour des horizons proche, moyen et lointain.

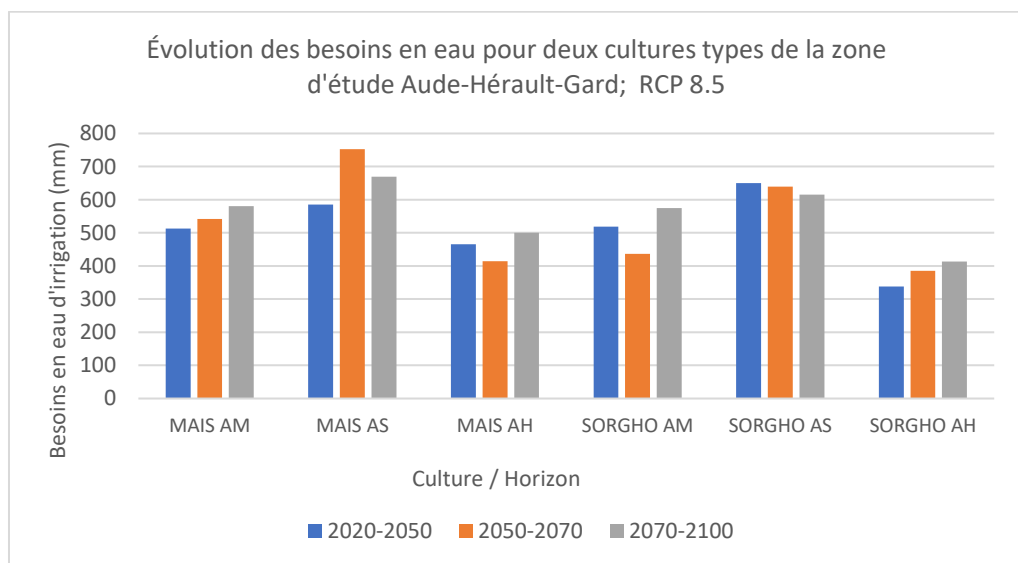


Figure 9: Évolution des besoins annuels en eau modélisées avec Aquacrop pour le RCP 8.5 (AM : Année médiane, AS : Année sèche, AH : année humide) sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard, pour des horizons proche, moyen et lointain.

Pour cette zone d'étude, les mêmes tendances générales à la hausse se dégagent, avec également quelques tendances qui varient comme pour le maïs en année humide et le sorgho en année sèche.

4.2.3.5. Modélisation des besoins en eau d'irrigation en fonction des pratiques agricoles.

Avec les modèles permettant de paramétrer des pratiques culturales en entrée, en particulier STICS, il est possible de modéliser précisément l'apport d'intrants, de changer les calendriers d'irrigation,

d'apporter de la matière organique et autres pratiques agricoles dont certaines pourraient changer la quantité d'eau dans les sols, et in fine les besoins en eau d'irrigation si les conditions sont favorables.

Pour tester cette hypothèse, nous avons choisi de modéliser l'effet d'apports de résidus de culture organiques sur l'évolution des paramètres hydriques de la culture. Avec STICS, les résultats obtenus sont les suivants :

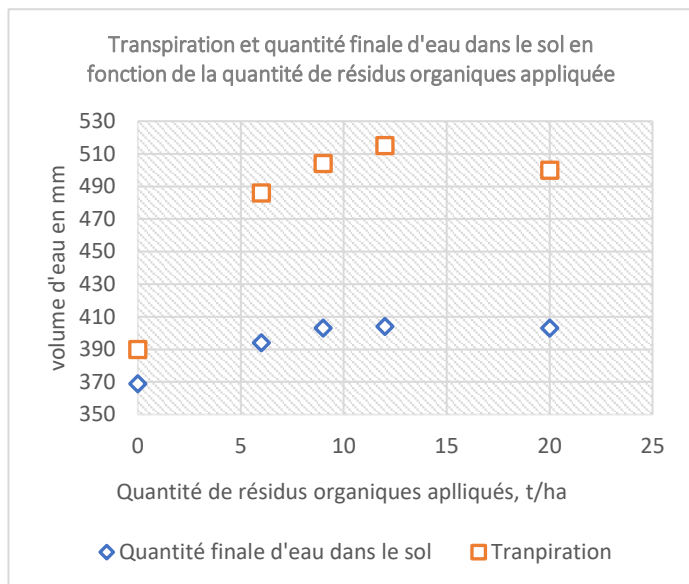


Figure 10 : Transpiration et quantité finale d'eau dans le sol en fonction de la quantité de résidus organiques appliquée pour une culture de soja, année 2019, bassin versant de l'Asse.

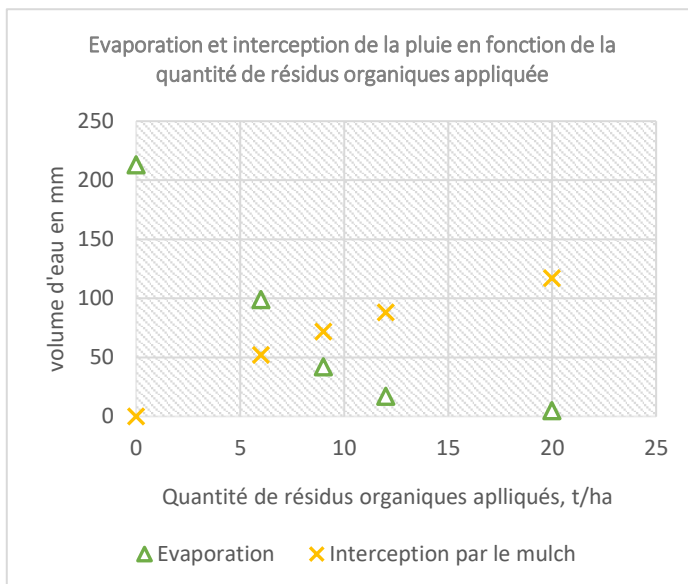


Figure 11 : Evaporation et interception de la pluie en fonction de la quantité de résidus organiques appliquée pour une culture de soja, année 2019, bassin versant de l'Asse.

Le bilan hydrique de ce procédé est positif : la quantité finale d'eau dans le sol augmente avec une stabilisation à partir de 10 t/ha appliquées. On constate une diminution drastique de l'évaporation, particulièrement si on le compare à un scénario sans utilisation du mulching.

Ces résultats sont à nuancer dans cette modélisation, l'interception de la pluie par le mulch augmente, et la transpiration de la culture de soja augmente également de plus de 25% entre un scénario sans pratique de mulch et tous les autres. Cela est dû aux paramétrages spécifiques du modèle STICS. L'augmentation de la transpiration pourrait notamment expliquer pourquoi la quantité d'eau dans le sol varie peu.

Le bilan de cette pratique d'agriculture de conservation des sols est donc d'augmenter la réserve en eau des sols. Cela est observable alors que nous ne prenons pas en compte d'autres facteurs comme l'augmentation des rendements, la protection aux ravageurs et l'apport en éléments qui remplacent en partie les intrants chimiques (Shirish et al., 2013; wpActiSol, 2024). Des études existent ayant déjà mis en avant ces phénomènes mais l'intérêt d'un modèle comme STICS est la possibilité de quantifier l'évolution des quantités d'eau dans le sol et de pouvoir modéliser ces évolutions sur des périodes futures selon plusieurs scénarios climatiques.

Une prise de recul sur l'ensemble de ces résultats est réalisée dans la partie LIMITES ET DISCUSSION.

5. L'UTILISATION ET LE CALCUL D'INDICATEURS AGRO ET ECO-CLIMATIQUES

5.1. Objectifs

Dans le cadre de diagnostics de l'effet du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation des cultures à l'échelle parcellaire ou d'un bassin versant, il est pertinent d'utiliser des indicateurs précis permettant de caractériser cet impact sur les cultures qui constituent l'assolement de la zone d'étude.

C'est pour la recherche d'outils permettant de calculer ou extraire des indicateurs agro et éco-climatiques que j'ai réalisé un échange d'une semaine à l'INRAE d'Avignon, dans les locaux de l'unité [AGROCLIM](#). Cette unité de recherche a mis en place la plateforme SICLIMA⁹ qui permet d'extraire des données climatiques à l'échelle des mailles SAFRAN, et de calculer des indicateurs pour plusieurs cultures et de décrire ainsi les variations induites par le changement climatique sur les stress thermiques et hydriques, les décalages des stades phénologiques, et autres indicateurs d'intérêt. Certains de ces indicateurs ne peuvent être calculés simplement avec des modèles de culture, démontrant l'intérêt de plateformes comme Agroclim. Une autre plateforme existante propose de calculer des indicateurs simples avec les mêmes objectifs : **CANARI**¹⁰ (*Climate ANalysis for Agricultural Recommendations and Impacts*).

Nous utiliserons la plateforme Agroclim pour extraire des indicateurs permettant de décrire dans les zones d'étude (Alpes de Haute Provence et Aude-Hérault-Gard) les impacts du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation des cultures.

5.2. Méthodologie

À la suite des recherches réalisées pour l'état de l'art sur les projets prospectifs (partie 3), nous avons tenté de modéliser les indicateurs préconisés par certains projets prospectifs, ou demandés par les acteurs locaux, en particulier les agriculteurs et qui seraient pertinents pour quantifier l'impact du changement climatique. Dans la zone d'étude des Alpes de Haute-Provence, le calcul de nouveaux indicateurs répond également à la demande des partenaires de la chaire et acteurs du projet « Vers des systèmes de culture adaptés au changement climatique et ressources en eau contraintes en Haute Provence » (Chambre d'agriculture Alpes de Haute-Provence et al., 2023).

Il est possible d'utiliser la plateforme nommée **SICLIMA** (ainsi que **GETARI** spécifiquement pour le calcul de nouveaux indicateurs) et **TEMPO**¹¹ spécifiquement pour l'extraction de données réelles des variations des stades phénologiques) pour le calcul d'indicateurs agro-climatiques mais aussi d'indicateurs éco-climatiques.

Il faut premièrement choisir la base de données à partir de laquelle on extrait nos données climatiques (DRIAS ou SAFRAN) pour créer un projet de calcul sur la plateforme. Ensuite, il faut choisir le mode de calcul des indicateurs, agro ou éco-climatique.

- **Agro-climatique**, sur la base de l'identification de dates calendaires pour les stades de début et de fin de phase. Ce choix implique que les dates de calcul sont identiques pour toutes les années prises en compte dans le projet de calcul.
- **Éco-climatique**, 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

⁹<https://agroclim.inrae.fr/siclisma/?ticket=STaa2c7be974fe5c7f425f10b5ae6e3919d4dd572e330b54ff74abf937a5e67aa5>

¹⁰ Lien de la plateforme : <https://climadiag-agriculture.fr/indicators>

¹¹ La plateforme est accessible avec le lien suivant : [TEMPO](#)

entre ces stades phénologiques. Contrairement au mode agro-climatique, ce choix implique que les dates de calcul sont différentes selon les années prises en compte dans le projet de calcul.

La différence agro / éco – climatiques est visualisable sur la figure 25 en Annexe 3 : Illustrations

L’outil **TEMPO** est une interface web (mise en place également par Agroclim) qui recense des données scientifiques, participatives et autres sur la phénologie des espèces végétales diverses sur le territoire français. Il permet d’observer la variation de la phénologie en fonction du temps et du changement climatique, avec en particulier le décalage du cycle des cultures. Il sera donc utile au calcul d’indicateurs éco climatiques.

La plateforme **SICLIMA** permet de calculer les indicateurs climatiques pour chaque stade phénologique de la culture demandée. Ainsi, pour les indicateurs agro-climatiques, nous pouvons choisir la durée des stades phénologiques (détaillés dans le Tableau 16). Puis, nous pouvons choisir le stade phénologique sur lequel nous voulons simuler les indicateurs.

Une fois le mode de calcul choisi, on peut calculer un indicateur disponible sur SICLIMA sur une ou plusieurs mailles, ainsi que pour une ou plusieurs périodes choisies. Plusieurs représentations graphiques sont possibles en faisant varier l’échelle, l’agrégation temporelle, le nombre de classes, etc.

5.3. Résultats : les indicateurs extraits et calculés

Les indicateurs choisis sont issus d’une réflexion interne. Une phase de sondage d’experts serait pertinente afin de préciser les objectifs et les choix d’indicateurs à calculer et mettre en place.

5.3.1. Indicateurs agro climatiques « simples »

Premièrement, nous pouvons simuler les indicateurs pertinents présents sur la plateforme de calcul SICLIMA pour caractériser les évolutions climatiques qui auront un impact dans le futur sur les besoins et le développement des cultures.

- Le pourcentage de jours sans pluie pendant les stades phénologiques déterminants.

Le stress hydrique a une influence sur la croissance et le rendement des cultures qui est plus ou moins important selon le stade phénologique de la plante. Par exemple, le modèle STICS n’autorise pas la levée des graines s’il n’y a pas eu irrigation ou pluie sur les jours proches du semis. De la même façon, nous savons que pendant la croissance végétative, la floraison, la véraison ou autres stades phénologiques de la vigne, il est déterminant d’avoir un état hydrique correct sur la parcelle pour ne pas mettre en péril le rendement (*IRRIGUER LA VIGNE, s. d.*). Le pourcentage de jours sans pluie sur ces stades phénologiques de la vigne permet donc d’observer l’impact du changement climatique sur les besoins en eau. Si le stress hydrique est trop important ou récurrent, l’irrigation sera nécessaire sur ces stades.

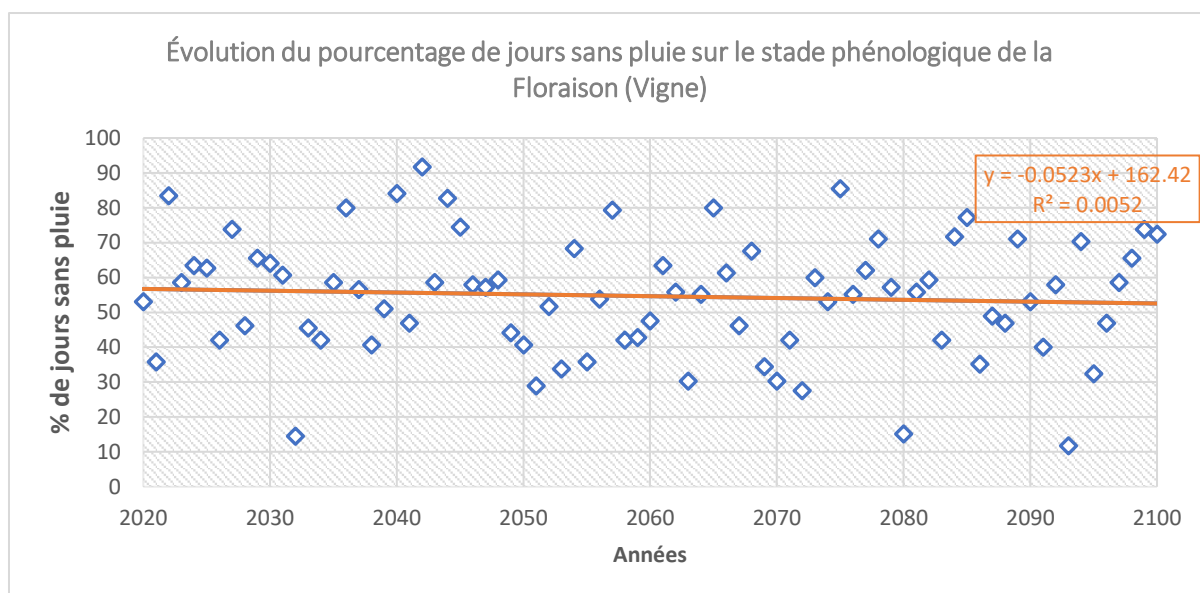


Figure 12 Évolution du pourcentage de jours sans pluie sur le stade phénologique de la Véraison (Vigne) entre 2020 et 2100, dans le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5

Ces résultats sont également modélisables pour les autres stades phénologiques où le stress hydrique est déterminant sur le rendement final. Nous observons une tendance à la baisse, mais non significative.

Il est également possible de simuler un indicateur permettant de comparer l'impact du stress hydrique à des stades phénologiques précis entre des cultures annuelles et des cultures pérennes. En effet, les cultures pérennes vont avoir des racines plus développées et la baisse de la réserve utile des sols pourrait hypothétiquement avoir moins d'impact sur ces cultures par rapport à une culture annuelle dont les racines sont moins profondes. Nous n'avons pas réussi à montrer une différence de besoins en eau d'irrigation avec les modèles STICS et Aquacrop en comparant deux fois la même culture mais en paramétrant une profondeur racinaire différente. Cependant, lors du début de cycle, une culture annuelle qui n'a pas de système racinaire développé va être plus en difficulté qu'une pérenne avec un système racinaire déjà en place (comme dit précédemment, avec STICS une culture annuelle en stress hydrique lors du semis ne va pas lever, alors qu'une pérenne peut continuer à fonctionner en puisant plus bas si elle est déjà en place). Voici par exemple l'évolution de la quantité de jours de déficit hydrique chez le blé dur pendant les dates de semis :

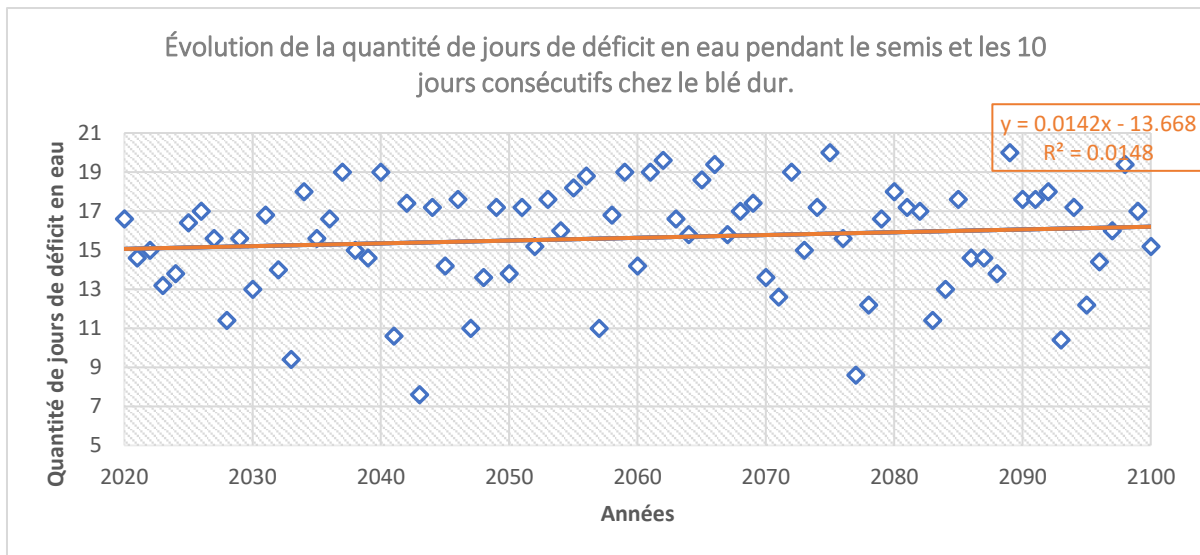


Figure 13 : Évolution de la quantité de jours de déficit en eau pendant le semis et les 10 jours consécutifs (blé dur) entre 2020 et 2100, dans le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5.

D'autres indicateurs pertinents qui permettent de modéliser ce type de stress sur chacun des stades phénologiques sont les jours avec déficit hydrique, la somme des déficits en eau, les jours consécutifs avec (P - ETP) inférieur à un seuil déterminé, les vagues de sécheresse ou le rapport teneur en eau du sol sur capacité au champ.

- Date du dernier jour de gel et évolution de cette date (indicateur « fin risque de gel »)

Pour des cultures annuelles, avec en particulier l'arboriculture, les stades phénologiques des plantes déterminent si l'impact des gels sera plus ou moins néfaste (Cain, 2022 ; Gel et dégâts de gel sur vigne, s. d.). Un stade tel que le débourrement est très sensible au gel par exemple. Dans le cas du pommier, ce sont les gels de printemps qui sont les plus néfastes. L'indicateur « Fin risque de gel » permet donc de voir l'évolution de la date du dernier gel printanier (ici, exemple de la vigne mieux documentée sur SICLIMA).

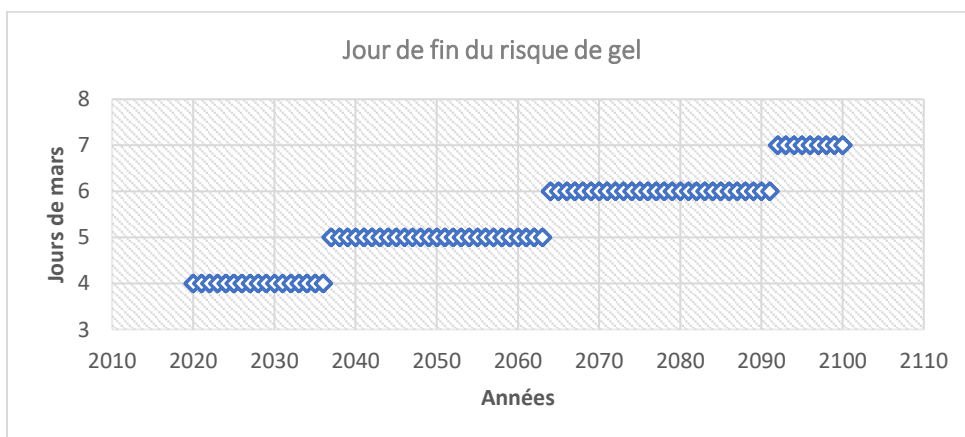


Figure 14 : Évolution du jour de fin du risque de gel (Vigne) entre 2020 et 2100, dans le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5.

La vigne est sensible au gel à plusieurs moments de son cycle de croissance (Gel et dégâts de gel sur vigne, s. d.). D'après la figure ci-dessus, les derniers gels printaniers vont avoir lieu plus tardivement. Dans le cadre du travail sur les jours de froid et froid extrême, nous pouvons également travailler avec SICLIMA sur l'évolution du pourcentage de jours vernalisants, pour simuler l'évolution de l'aptitude des plantes à fleurir.

- Pourcentage de jours avec le sol très humide (excès d'eau) lors de la levée des cultures annuelles.

Dans le sens contraire, des excès d'eau suite à des pluies hivernales saturant les sols peuvent empêcher partiellement ou totalement le développement des cultures (*Préparation des semis - Attendre le ressuyage des sols en profondeur avant d'intervenir*, 2024). Nous avons regardé l'évolution du pourcentage de jours avec des sols très humides lors du stade suivant le semis pour le blé dur et pour le blé tendre. D'autres indicateurs permettant de qualifier ce type d'effet sont l'évolution du nombre de jours avec des sols humides et très humides (définis par un seuil pouvant être variable sur Agroclim), la fréquence des jours où l'humidité du sol est supérieure à la capacité au champ, le nombre, la somme et la fréquence de jours de pluie en excès. Sans compter que l'humidité de l'air peut engendrer plusieurs enjeux comme la présence plus probable de maladies.

5.3.2. Des indicateurs éco-climatiques

Une des influences du changement climatique est celle de faire varier les dates des stades phénologiques des cultures. Premièrement, cela peut faire varier les besoins totaux en eau car une culture qui est récoltée plus tôt ou plus tard n'aura pas les mêmes besoins en irrigation. Des indicateurs permettent de qualifier ces effets.

- Évolution des besoins en eau en fonction du décalage des stades phénologiques dans le temps.

Le décalage des stades phénologiques peut s'observer à partir de l'interface de SICLIMA. Par exemple, des résultats pour le maïs sont représentés pour le bassin versant de l'Asse sur la figure suivante :

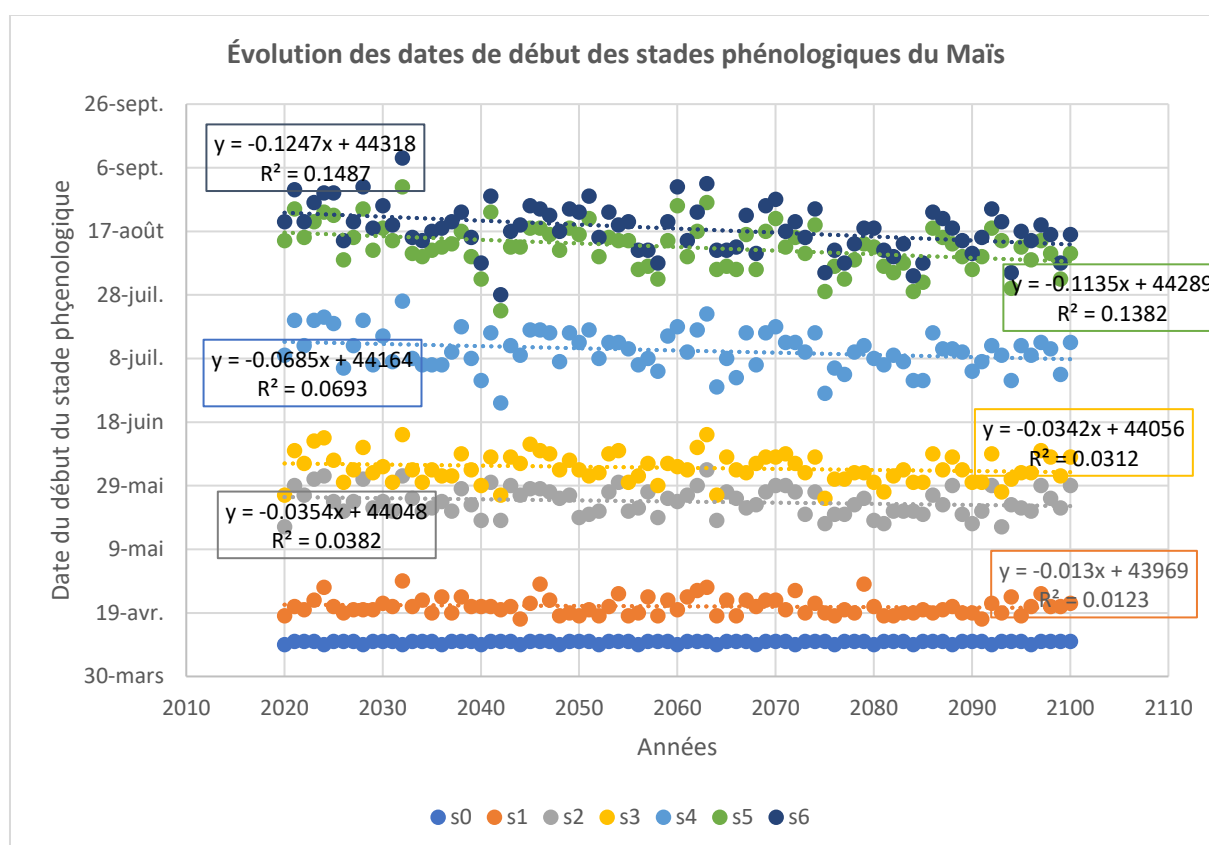


Figure 15: Évolution des dates des stades phénologiques du maïs dans la période 2020-2100 sur le bassin versant de l'Asse pour le RCP 4.5. La description des stades phénologiques se trouve en annexe 3, tableau 16

Les Alpes de Haute Provence ne font pas exception à l'évolution plus précoce des stades phénologiques à cause de la hausse des températures. Cette tendance continue est visible depuis au moins les années 60 (voir [Figure 26](#)).

L'indicateur permettant de mesurer les besoins en eau en fonction du décalage des stades phénologiques peut être obtenu en deux étapes. Premièrement, il faut calculer l'indicateur « durée de la phase » pour connaître les dates de chaque stade phénologique. Deuxièmement, il faut modéliser les besoins en eau d'irrigation avec des modèles de culture comme STICS ou Aquacrop, qui permettent de changer la durée du cycle de culture. Ce processus est long et répétitif, et c'est pourquoi nous proposons en perspective qu'une automatisation de ce calcul soit faite sur la plateforme de SICLIMA avec un modèle de culture choisi. Par contre, nous pouvons utiliser Aquacrop et STICS pour modéliser l'impact du changement climatique en modélisant des cultures et en prenant en compte l'évolution des degrés jours. Nous pouvons également comparer les besoins en eau d'irrigation d'une culture en fonction de la variété prise en compte : une variété précoce sera peut-être moins consommatrice en eau par rapport à une variété tardive.

Les tableaux suivants présentent l'évolution des besoins optimaux en eau de la betterave en prenant en compte les degrés jours avec le modèle Aquacrop, ainsi que le rendement et la durée de cycle de croissance :

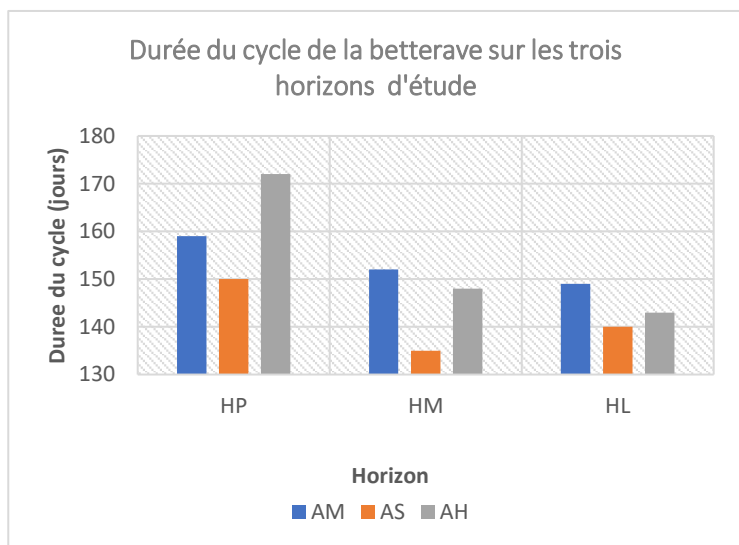


Figure 17 : Durée du cycle de la betterave modélisée par Aquacrop sur un horizon proche (2020-2050), un horizon moyen (2050-2070) et un horizon lointain (2070-2100) pour une année sèche AS, une année médiane AM, et une année humide AH, sur le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5

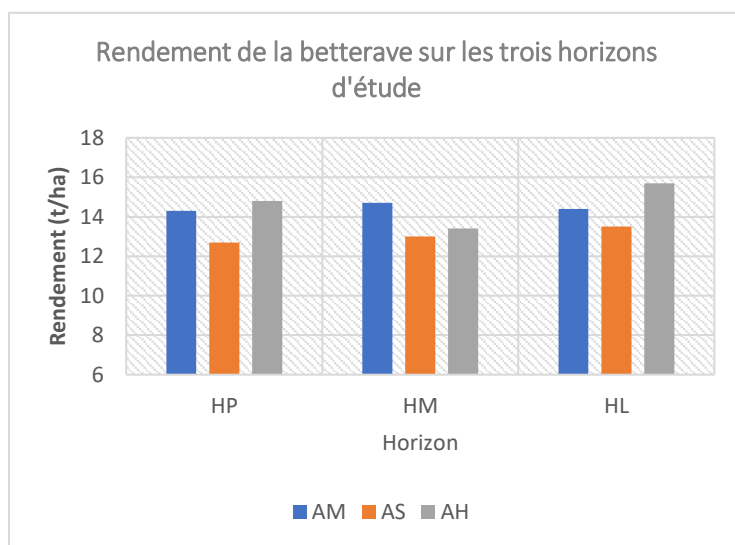


Figure 16 : Rendement de la betterave modélisé par Aquacrop sur un horizon proche (2020-2050), un horizon moyen (2050-2070) et un horizon lointain (2070-2100) pour une année sèche AS, une année médiane AM, et une année humide AH, sur le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5

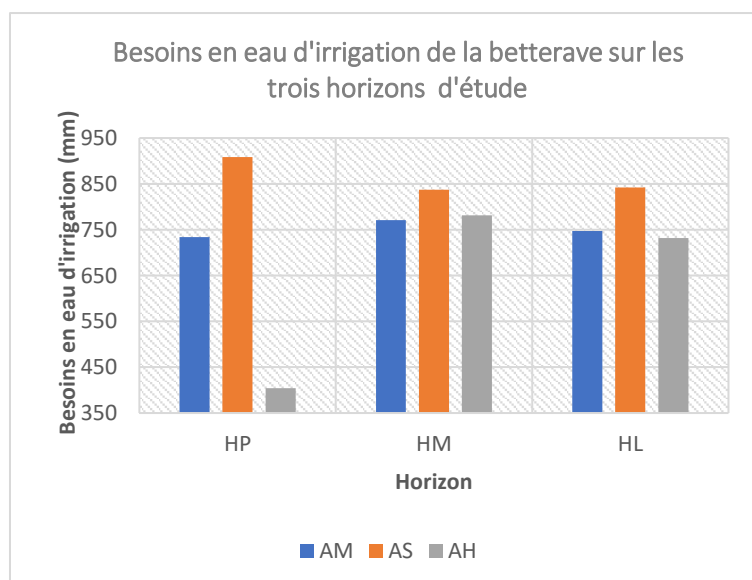


Figure 18 : Besoins optimaux en eau d'irrigation de la betterave modélisés par Aquacrop sur un horizon proche (2020-2050), un horizon moyen (2050-2070) et un horizon lointain (2070-2100) pour une année sèche AS, une année médiane AM, et une année humide AH, sur le bassin versant de l'Asse, RCP 4.5

La durée des cycles diminue bien dans le cas d'une hausse des températures, sans que l'on aperçoive une différence significative entre les horizons modélisés. En prenant en compte les degrés jours, les besoins en eau d'irrigation modélisés sont également supérieurs dans le cas d'une année sèche par rapport à une année humide.

Il aurait été intéressant de modéliser les besoins en eau d'irrigation avec et sans prise en compte des degrés jours et de comparer les différences entre ces simulations, avec en particulier l'évolution de ces différences dans le temps en fonction des horizons.

La liste exhaustive des indicateurs calculables avec SICLIMA est détaillée dans leur site ¹².

6. LIMITES ET DISCUSSION

6.1. Limites de l'étude et de la méthodologie

6.1.1. Le choix des modèles et des données climatiques

Le choix des modèles de culture pour ce stage cherchait à couvrir un spectre de complexité de modélisation. Plus de modèles existent et pourraient également servir d'outil pour atteindre les objectifs du projet. Les données climatiques issues de DRIAS (et donc du modèle CNRM) nous ont semblé être cohérentes pour atteindre les objectifs de ce stage. Les données sont néanmoins à l'origine de résultats qui auraient été différents à partir d'un autre modèle. Nous sommes conscients de ce choix et nous invitons les personnes intéressées à travailler avec d'autres sources et modèles pour avoir une vision plus large de la modélisation climatique.

6.1.2. Des incertitudes sur certaines de données

Les données de prélèvements prévisionnels et réels comportent des incertitudes dans le cas des deux zones d'étude. Les compteurs ne donnent que des valeurs de prélèvements, et ne peuvent être associés à une culture en particulier. C'est pourquoi la chambre d'agriculture des Alpes de Haute Provence ou BRLi se basent sur les déclarations des agriculteurs tout en sachant que des incertitudes existent.

De plus, nous avons simplifié l'assolement des zones d'étude pour pouvoir le modéliser dans un délai de temps correct. Si nous voulons avoir plus de détail sur les besoins d'irrigation modélisés, il faudrait prendre en compte l'assolement réel des territoires et les modéliser à leur tour.

Pour la prospective sur les besoins en eau des cultures à l'échelle d'un bassin versant, ou d'une zone d'étude avec plusieurs cultures, il est nécessaire d'identifier les parcelles irriguées au sein de l'ensemble du Référentiel de Parcelles Géographiques (RPG) du bassin versant. En effet, cela permet d'éviter des erreurs liées à la modélisation de l'entière d'un assolement où plusieurs des parcelles ne sont en réalité pas irriguées et ne consomment donc pas d'eau. Cependant, ces données ne sont pas toujours accessibles. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de connaître les parcelles irriguées. Elles se basent soit sur la télédétection (*Les outils numériques pour la gestion de l'eau en agriculture*, 2023), soit sur les connaissances du terrain par les chambres d'agriculture par exemple. La contribution de la télédétection est également décrite dans l'article à paraître (fin 2024) de Courault et al., nommé « La contribution de la télédétection pour caractériser les zones irriguées et les prélèvements d'eau pour l'irrigation ».

¹² <https://agroclim.inrae.fr/siclisma/help/references/indicateurs.html>

Les données de sol servant à modéliser les zones d'étude sont tirées de Gis-Sol, et leur degré de précision est très bas. Si des données plus précises sont disponibles, il faut les utiliser pour mieux représenter la réalité des besoins en eau sur la zone étudiée.

En plus des incertitudes sur les données permettant de faire le paramétrage des modèles, il faut de plus prendre en compte la possible inaccessibilité à celles-ci. Par exemple, pour comparer les résultats de la modélisation à des données réelles d'irrigation, nous avons eu la chance d'avoir accès aux données des partenaires mais ce n'est pas toujours le cas.

6.2. La pertinence des modèles de culture et leurs limites

Cropwat est un modèle qui a permis de révéler l'importance du choix des données d'entrée. L'ensemble de la modélisation avec ce modèle a d'abord été réalisé avec des données climatiques issues de météo-France avec un pas de temps mensuel. Si ces données sont plus faciles à paramétrer, elles effacent toutefois de nombreuses informations. Par exemple, un mois où il a plu 30 mm, peut être soit un mois où tout est tombé en une journée et la majorité de la ressource en eau n'a donc pas pu s'infiltrer, soit un mois où la pluie se distribue sur plusieurs jours. Dans le premier cas, la culture pourrait être soumise à un stress hydrique car il ne pleut plus depuis plusieurs jours et l'estimation des besoins en eau d'irrigation va être plus élevée mais le modèle ne prendra pas cette information en compte. Nous recommandons l'utilisation du pas de temps journalier pour les entrées et les sorties des modèles. Un autre exemple est le fait qu'avec le pas de temps mensuel, faire varier le type de sol (et la réserve utile RU associée) n'a pas d'influence sur les résultats finaux de besoins en eau d'irrigation. Nous pouvons proposer la même explication que précédemment, avec une redistribution moyenne des précipitations sur l'ensemble du mois alors que la réalité pourrait être une absence de pluie depuis plusieurs jours, impactant la RU et donc les résultats finaux.

En réalité les modèles de culture, surtout quand ils sont complexes, se basent sur beaucoup d'hypothèses et d'options, dont le paramétrage peut changer les résultats finaux. Pour **STICS** et **Aquacrop**, la prise en compte des degrés jours, la méthode de calcul de l'ETP, l'influence des sols, les paramètres d'entrée des cultures, la méthode de calcul de l'irrigation nécessaire et plusieurs autres paramétrages, sont différents entre les modèles. D'autres facteurs pouvant expliquer la variabilité des résultats proviennent de l'incertitude des données d'entrée. Par exemple, **Cropwat** estime le rayonnement net reçu à partir de la latitude de la zone d'étude et des heures d'ensoleillement journalières. Les autres modèles eux prennent le rayonnement dans les données d'entrée. Les paramètres concernant le développement racinaire, le calendrier et les phases de croissance, la teneur en eau nécessaire à la germination, et plusieurs autres dizaines de paramètres, varient entre les modèles et sont aussi à l'origine des incertitudes sur les résultats entre les modèles. Même si les données climatiques vont influencer les résultats émis par les modèles de culture, il faut savoir également savoir que **Cropwat** par exemple ne prend pas en compte l'évolution de la concentration de CO₂ dans l'air.

Un exemple est le paramétrage des données d'entrée climatiques sur **Aquacrop**, où le modèle ne prend pas en compte la valeur de certaines données quand celles-ci dépassent les intervalles permis par le modèle. Pour le vent par exemple, le modèle n'accepte pas de valeurs au-dessus de 15 m/s, ou pour le rayonnement, le modèle n'accepte pas (en fonction de l'emplacement de la zone d'étude) des données dont la valeur dépasse les 450 W/m². Il faut donc faire l'hypothèse que ces jours-là, les valeurs de vent et de rayonnement net journalier sont égales au maximum possible permis par le modèle. Pour illustrer le grand nombre de possibilités d'entrées et de paramétrage, le guide conceptuel de **STICS** (*Beaudoin et al., 2023*) liste l'ensemble des paramètres d'entrée dans la partie A.1 « Definition of parameters ». Un autre exemple de simplification pour le paramétrage des modèles est le choix de considérer qu'il n'y a pas de nappe sur la zone d'étude, car nous ne connaissons pas les données de sol en précision ni la présence ou non de nappes sur les parcelles modélisées. Les résultats pourraient varier selon la culture modélisée et la possibilité de celle-ci à accéder à l'eau de la nappe en profondeur.

STICS est un outil à part parmi les modèles de culture sur lesquels nous avons travaillé. Le paramétrage demande beaucoup plus de temps, au point que nous avons relevés des erreurs qui ont dû être corrigées dans le code du logiciel. Je pense particulièrement au fait que les graines ne germaient pas avec l'option d'irrigation automatique qui permet de calculer les besoins en eau. Il a donc fallu pour chaque culture, pour chaque année, pour chaque période, pour chaque horizon et pour chaque RCP, ajouter 20 mm de pluie dans le fichier climatique au moment du semis pour simuler une irrigation et pouvoir modéliser correctement. Nous sommes encore en contact avec les membres de l'équipe d'Agroclim pour échanger sur la pertinence de **STICS** pour modéliser les besoins en eau d'irrigation. L'option d'irrigation automatique repose sur plusieurs calculs et indicateurs qui pourraient expliquer pourquoi les résultats de simulations ne suivent pas les mêmes tendances que les autres modèles. Les formules de calcul d'indicateurs utilisées par le modèle devraient également pouvoir expliquer pourquoi nous obtenons après modélisation des besoins en eau plus élevées pour une parcelle couverte de mulch que pour une culture sans dépôts de débris organiques.

Ce modèle nécessite donc un paramétrage précis, et le paramétrage du sol ne fait pas exception. C'est pourquoi **STICS** par rapport aux autres modèles ne permet pas de simuler facilement un sol avec une réserve utile (RU) que nous voulons imposer. Le modèle ayant pour but de décrire une parcelle connue, il accepte le paramétrage de la texture, structure, profondeur et autres caractéristiques du sol. Le paramétrage des autres modèles est sensiblement le même, mais pour **STICS** en particulier il est difficile de déterminer une RU voulue. Sachant que nous nous basons sur les données de RU de Gis-Sols, cela peut être une limite d'utilisation de **STICS**. Si on veut se rapprocher de la réalité, il faudra avoir plus d'informations sur les sols des zones qui seront étudiées pour être simulées.

STICS est donc pertinent quand il s'agit de travailler spécifiquement sur l'effet de certaines pratiques agricoles, ou lorsqu'on souhaite simuler certains indicateurs agro ou éco-climatiques. Cependant, le modèle, en tant qu'outil qui pourrait servir à des acteurs qui ne connaissent pas la modélisation, est peu adapté quand il s'agit de simuler plusieurs scénarios et plusieurs cultures. Les résultats mettent du temps à être modélisés mais surtout, le paramétrage est chronophage, tant sur sa mise en place que sur sa compréhension. Des connaissances agronomiques sont donc nécessaires à l'utilisation du modèle dès le paramétrage, et l'aide des membres d'Agroclim a été essentielle.

En comparaison, **Aquacrop** et **Cropwat** ont des interfaces simples et rapidement compréhensibles, avec des tutoriels disponibles et clairs en libre accès (par exemple sur le site web de la FAO¹³, ou sur YouTube pour **Cropwat**). Avec ces deux modèles, il y a la possibilité de réaliser une modélisation robuste si on a en notre possession beaucoup d'informations sur une parcelle. Il y a également la possibilité de travailler avec rapidité si l'on cherche à connaître des tendances sans vouloir obtenir des besoins réels en eau très précis. En tant qu'outils de diagnostic, ils peuvent donc être plus adaptés à une utilisation rapide et plus au moins approfondie selon les attentes des porteurs de PTGE.

Cropwat est donc un modèle « de poche » qui peut permettre d'approcher les besoins en eau d'irrigation de façon globale. Un défaut que nous avons rencontré sur ce modèle réside dans le paramétrage des données climatiques. Les données climatiques issues du portail DRIAS ne contiennent pas d'information sur le temps d'ensoleillement journalier. Or, **Cropwat** nécessite ces données pour estimer le rayonnement net reçu, en W/m². Cela n'est pas un problème de taille car le logiciel peut fonctionner en entrant simplement des données d'ETP journalières ou mensuelles, mais il est important de savoir que les résultats ne seront pas les mêmes en utilisant cette méthode car le modèle fait une approximation.

Malgré cette simplicité donnée par l'utilisation d'interfaces, la modélisation de plusieurs scénarios climatiques, de plusieurs horizons, plusieurs années par horizon et de plusieurs cultures, est une mission qui est extrêmement chronophage. Certains des modèles permettent plus ou moins d'être automatisés, mais malgré ceci, le simple paramétrage de tous les horizons et scénarios, couplé aux erreurs de

¹³ Site web de la FAO: <https://www.fao.org/aquacrop/resources/tutorials/en/>

manipulation et à l'apprentissage de l'utilisation des modèles, peut demander beaucoup de travail. Nous conseillons de ne pas sous-estimer la charge horaire, les capacités et les compétences nécessaires (STICS en particulier) pour travailler avec ces modèles. **STICS** est d'ailleurs pertinent pour comparer plusieurs scénarios à la fois. Il est possible de comparer plusieurs modélisations (sur une année sèche, humide et médiane par exemple) à la fois, pour comprendre l'effet de certaines pratiques, ou de climats différents.

Les modèles de culture permettent d'obtenir des résultats sur les variables du bilan hydrique de la parcelle ou culture simulée sur un pas de temps journalier, mensuel ou annuel. En essayant différentes cultures ou variétés, ou des dates de semis différentes, les modèles sont donc utiles à mieux comprendre l'évolution des besoins en eau d'irrigation non seulement en termes de quantités mais aussi leur évolution dans le temps. Couplés aux indicateurs phénologiques, les porteurs de PTGE ou (bureaux d'études qui pourraient se spécialiser dans la méthode) auront des outils pour choisir des assolements avec les cultures, les variétés ou les pratiques agricoles pertinentes pour économiser la ressource en eau.

6.3. Les résultats de la modélisation peuvent être affinés

Les résultats de modélisation nous ont permis d'observer plusieurs différences entre les besoins en eau d'irrigation modélisés et des besoins en eau issus d'un référentiel ou des données de prélèvements réels. Nous avons vu que les assolements comparés ne représentent pas la même surface, ce qui explique une grande partie de la différence entre les résultats. De plus, les cultures sont irriguées de façon différente à ce que nous avons cherché à modéliser (besoins optimaux en eau d'irrigation), car pour cela il faudrait pratiquer une agriculture de précision et connaître l'état hydrique de ses parcelles au pas de temps journalier pour ainsi irriguer dès qu'un seuil de stress de développement de la canopée est franchi. En réalité, les agriculteurs irriguent en fonction de conditions climatiques, économiques et de gouvernance qui varient tous les ans sur le terrain. Pour des raisons de prix, d'accès à l'eau et de praticité ou tout simplement à cause d'interdictions dues aux conditions climatiques, les parcelles ne sont quasiment jamais menées à l'optimum. Ce principe a été évoqué dans la partie 2 du rapport, par les membres de la chambre d'agriculture des PO. Les modèles vont donc avoir tendance à surestimer les besoins en eau par rapport à ce qu'on observe dans la réalité, et cela peut également expliquer la différence entre les résultats simulés et les données réelles à l'échelle du bassin versant comme à l'échelle parcellaire. Un facteur d'amélioration pour les prochaines modélisations pourrait donc être d'utiliser des données de l'assolement qui varient chaque année. En effet, nous avons comparé à l'échelle de la zone d'étude les besoins en eau simulés et les prélèvements réels pour les années 2019, 2022 et 2023. Mais l'assolement que nous avons pris en compte dans la modélisation était toujours le même. Si nous avions pris l'assolement de chaque année pour simuler les besoins en eau d'irrigation (il faut que ces données soient disponibles), nous aurions eu moins de différences avec les prélèvements réels.

Pour la zone d'étude Aude-Hérault-Gard, la différence entre les besoins réels du bassin versant et les besoins en eau d'irrigation modélisés sont en partie dus à l'erreur de modélisation sur la vigne. Mais les mêmes facteurs que pour le bassin de l'Asse expliquent aussi ces erreurs en partie. Les cultures ne sont pas menées à l'optimum de ses besoins, soit pour des raisons locales comme des interdictions de prélèvements, soit par volonté. Les vignerons peuvent chercher à stresser leurs cultures pour des questions de qualité du produit. Enfin, les données de prélèvements réels d'eau à la borne sont visibles dans l'extrait du tableau 17 en [Annexe 3](#) : Illustrations. On observe que la surface irriguée est fixe mais que chaque année les prélèvements changent. Une part de la différence entre les résultats obtenus peut donc provenir de la surestimation de la surface irriguée qui en fait est bien inférieure à celle utilisée pour le calcul des besoins à l'échelle de la zone d'étude, et que donc les prélèvements réels sont également inférieurs.

Néanmoins, nous remarquons la proximité des résultats quand nous estimons les besoins en eau d'irrigation à l'échelle du bassin versant avec le référentiel des besoins dans la région des Alpes de Haute-Provence avec les ordres de grandeur des résultats issus de la modélisation. Le référentiel propose

des données de référence sur les besoins en eau d'irrigation pour des cultures datant de 2014, ou antérieures. La comparaison entre la modélisation (sur les années 2019, 2022 et 2023) et le référentiel n'est donc pas pertinente pour quantifier les erreurs et les biais des modèles. Par contre, le référentiel montre que les données de prélèvements prévisionnels et réels peuvent être largement inférieures aux besoins optimaux en eau des plantes, et que les résultats des modèles ne sont donc pas forcément irréalistes ou du moins dans la surestimation de la réalité.

La modélisation des besoins en eau d'irrigation sur les horizons futurs et en fonction des RCP 4.5 et 8.5 donne des résultats qui permettent de comprendre l'évolution de ces besoins à court, moyen, et long terme. Les valeurs obtenues dans les figures 6 à 9 ne sont pas à prendre comme statistiquement significatives mais permettent de dégager une tendance à la hausse des besoins qui reste néanmoins non négligeable. En outre, ces tendances sont observables sur les deux zones d'étude, sur plusieurs périodes, et en fonction du RCP 4.5 et 8.5. Pour les années humides, la tendance n'est pas constante selon la culture et l'horizon modélisé. L'hypothèse d'un changement climatique qui non seulement intensifie les sécheresses mais aussi les fortes pluies sur des années humides pourrait expliquer ce résultat. Finalement, Cropwat est un modèle cohérent quand il s'agit de représenter l'évolution des besoins en eau d'irrigation, facile à utiliser et efficace pour dresser un bilan. Il est donc possible de travailler sur n'importe quel territoire, ce qui est une qualité de ces modèles.

De plus, les résultats de modélisation obtenus pour certaines cultures ne s'alignent pas avec la tendance : on le voit par exemple avec le maïs, qui d'après les quatre modèles utilisés consomme plus d'eau en 2019 qu'en 2022. Cela pourrait s'expliquer avec le cycle de culture de ces espèces. En effet, la détermination des années sèches et humides s'est faite sur la base de la comparaison des déficits hydriques des mois de mai à août, mais les précipitations peuvent varier sur le reste de l'année. Selon la culture modélisée, le cycle de développement se fera sur ces périodes. L'année 2019 est par exemple une année assez humide si on prend en compte le déficit hydrique sur l'ensemble de l'année.

L'objectif des pratiques comme le **mulching** est entre autres d'augmenter la réserve utile du sol. En revanche, même si les indicateurs du bilan hydrique du sol tendent vers une meilleure conservation de l'humidité, les besoins totaux d'irrigation augmentent de 100 mm avec l'option « mulching » de STICS par rapport à une modélisation où l'option est désactivée. Ces besoins ne varient pas quelle que soit la quantité de matière organique ajoutée. Cela paraît étrange en premier lieu, et mérite de se pencher sur le mode de calcul des indicateurs de stress hydriques qui déclenchent l'irrigation dans STICS. En effet, cette différence peut venir d'une paramétrisation propre au modèle sans que cela ne soit un résultat qui s'observerait dans un cas réel. Nous pouvons pour cela pointer la différence de rendement entre les pratiques : le mulch permet grâce à la disponibilité de plus de nutriments d'augmenter le rendement des cultures, la biomasse aérienne et donc la surface foliaire. Cela explique pourquoi la transpiration que nous avons observée est plus grande dans le cas de l'utilisation du paillis. Et finalement, cela pourrait aussi expliquer qu'au moment de la récolte, les besoins en irrigation ont été supérieurs. Par ailleurs, quand on compare le rendement des betteraves entre une année sèche, humide et médiane (pas de mulch), les rendements sont sensiblement différents également, de même que la biomasse aérienne. Cela pourrait également participer à expliquer pourquoi avec **STICS**, nous obtenons des résultats de besoins en eau d'irrigation plus difficiles à interpréter.

6.4. Des pistes pour des indicateurs agro et éco-climatiques à détailler

La transition à des cultures d'hiver permet de faire des économies d'eau. Souvent, il en est de même avec le choix de cultiver des variétés plus précoces. C'est le même effet qui est induit par le changement climatique quand les cultures ont un cycle qui devient naturellement plus court avec des températures plus élevées.

Les cultures pérennes peuvent permettre de diversifier les parcelles là où les stress hydriques deviennent trop importants et les rendements ne permettent pas de faire tourner l'exploitation à profit. Pour les vergers ou pour la vigne, les besoins en eau peuvent être plus ou moins importants selon la variété. Une piste d'indicateur intéressante serait de pouvoir calculer les économies d'eau réalisées par la diminution de la densité des cultures pérennes dans une exploitation. Par l'agrandissement des inter-rangs, ou par un semis plus espacé dans le même rang, des économies d'eau peuvent être réalisées et l'impact sur le rendement n'est pas forcément proportionnel. Cela démontre l'importance d'un indicateur mettant en perspective le rendement et les nouveaux besoins en eau d'irrigation. Ensuite, il serait intéressant d'observer le même effet sur des cultures annuelles.

Une autre piste de recherche est de quantifier grâce à des indicateurs l'effet de l'ombre que pourraient fournir des panneaux solaires sur l'ETP d'une parcelle agrivoltaïque. Sachant que les panneaux permettent de limiter les effets du stress hydrique (Ayat-Allah Bouramdane, 2022), la quantification de ces économies via un indicateur ou un ensemble d'indicateurs permettrait de faire rentrer des parcelles agrivoltaïques dans la création de nouveaux assolements.

Pour la modélisation à l'échelle du bassin versant, on ne prend pas en compte les effets macroscopiques dus à l'environnement qui constitue le bassin versant. La présence de montagnes, forêts, ou de plaines sèches et de zones urbanisées, peut faire varier les taux d'ETP dans les microclimats de la région (Sanderson et al., 2012), avec des effets liés à la variation d'albedo et aérodynamisme. Il serait intéressant d'affiner la transition de l'échelle parcellaire à l'échelle de bassin versant en prenant en compte l'environnement alentour.

Enfin, si l'utilisation d'indicateurs agro et éco climatiques est un outil de taille, SICLIMA n'est pas en libre-service car la gestion des serveurs n'est pas encore prévue pour loger des utilisateurs extérieurs à l'unité et aux partenaires. Cette possibilité est en discussion. La plateforme est, indépendamment de son accessibilité, un outil de taille dans la calcul rapide et concret d'indicateurs pertinents. Il propose une grande variété d'indicateurs et comme pour le portail CANARI, les chercheurs d'Agroclim sont ouverts à toute proposition sur des nouveaux indicateurs climatiques.

Nous avons montré avec des exemples concrets ce que pouvait fournir le portail, et proposé d'autres pistes d'indicateurs en perspective. Chacun de ces indicateurs que nous avons montrés peuvent être calculés pour une variété ou culture différente. SICLIMA est spécialisé sur les cultures de pomme de terre, blé et blé dur, le maïs et la vigne (avec plusieurs possibilités de variétés).

Cet outil est pour nous très pertinent à la caractérisation précise de l'effet du changement climatique. En perspective, il serait intéressant de voir le portail en libre accès, plus diversifié sur les cultures pour lesquelles on peut calculer des indicateurs, et avec les quelques indicateurs en plus que nous proposons ou que d'autres acteurs et agriculteurs en particulier voudraient être capable de calculer. Le logiciel [GETARI](#) est un outil d'évaluation et de calcul d'indicateurs qui pourrait servir à cet effet.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

7.1. Conclusion sur l'utilisation des outils et leur pertinence pour répondre aux objectifs du projet.

Les PTGE en émergence sont en phase de construction de scénarios prospectifs prenant en compte les impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau, les enjeux sociaux,

économiques et environnementaux qui se jouent en conséquence. En particulier, nous nous sommes intéressés pendant ce stage au fait que les porteurs des PTGE soient confrontés à plusieurs choix de modèles, indicateurs et autres outils permettant de mesurer l'impact du changement climatique sur l'évolution de besoins en eau d'irrigation sur des horizons variés entre 2020 et 2100. La documentation sur le sujet est effectivement diffuse et chaque projet prospectif utilise des méthodes différentes pour évaluer cet impact. Un état de l'art sur les outils existants et utilisés par les PTGE et autres projets prospectifs nous a montré les possibilités d'outils variées pouvant être utilisées, mais nous a également montré le manque de précision sur une méthodologie précise pouvant être utilisée par les PTGE. Le guide d'élaboration des PTGE n'est pas non plus encore clair sur le sujet.

Ce stage visait donc à développer et évaluer des méthodes quantitatives pour les besoins en eau d'irrigation à l'échelle de bassins versants où seront mis en place des PTGE. Des modèles de culture ont été choisis pour être évalués et comparés dans le temps imparti et la plateforme SICLIMA a été utilisée pour modéliser plusieurs indicateurs agro et éco-climatiques d'intérêt pour un diagnostic des impacts du changement climatique. D'autres indicateurs ont été mis en place également et une réflexion de nouvelles possibilités d'indicateurs a été exprimée.

Ces outils que nous avons comparés sont pertinents pour comprendre, évaluer et parfois quantifier l'évolution des besoins en eau des cultures avec le changement climatique. Les indicateurs issus de SICLIMA principalement, mais également obtenus grâce aux plateformes TEMPO, GETARI ou même CANARI sont également utiles à la caractérisation de cette évolution, ainsi qu'à celle des facteurs qui sont les causes de cette évolution (comme la sécheresse des sols, les périodes de chaleurs intenses, etc.). Nous avons néanmoins remarqué et précisé les limites de chaque outil, ces limites étant principalement des problèmes de précision des modèles et de difficultés à obtenir des résultats quantitatifs précis, ainsi que des limites d'accès aux données d'entrée des modèles. De plus, certains outils nécessitent beaucoup de temps et de connaissances en agronomie plus ou moins poussées.

Malgré ceci, nous recommandons les modèles de culture comme outils pour répondre aux objectifs du projet. L'outil SICLIMA est pertinent et facile d'utilisation, et une comparaison avec CANARI serait pertinente pour évaluer la facilité d'usage, la quantité d'indicateurs disponibles, et la disponibilité pour être utilisé par plusieurs acteurs à la fois.

7.2. Perspectives

Les données climatiques issues de DRIAS, ou du projet « Explore 2 », font une proposition sur l'évolution des données climatiques. Il existe des approches d'ensemble qui permettent de faire une analyse des biais et des incertitudes, avec plusieurs modèles. Par exemple, la méthode Qualypso a été utilisée dans le cadre d'« Explore 2 ». Il serait intéressant de reproduire ce processus entre les modèles de culture pour obtenir une analyse des biais entre eux.

Un facteur d'amélioration pour l'utilisation des modèles peut être la prise en compte du changement climatique sur l'état hydrique des sols. En effet, nous avons utilisé des sols avec une réserve utile prédéterminée pour chaque zone d'étude (issue de Gis Sols). Chaque modèle a donc été paramétré avec ces sols en question, mais nous n'avons donc pas pris en considération le fait que la RU des sols risque elle aussi d'évoluer avec le changement climatique sur des horizons futurs. Nous voyons donc en perspective l'utilisation d'indicateurs sur l'état hydrique du sol avec le changement climatique pour paramétrer les sols en entrée des modèles avec des données actualisées sur la période que l'on cherche à modéliser, et non avec des sols qui sont les sols d'aujourd'hui.

Un autre facteur d'amélioration de la précision des modélisations en perspective est de trouver des modèles qui sont capables de modéliser les quelques cultures que nous n'avons pu modéliser, ou de faire la demande de l'actualisation des modèles existants pour qu'ils soient capables de modéliser ces

cultures. Les cultures de la filière « plantes aromatiques à parfum et médicinales » (PAPAM) sont un exemple caractéristique : aucun modèle ne nous a permis d'estimer les besoins en eau d'irrigation de ces variétés, alors que les PAPAM constituent 30% de l'assolement du bassin versant de l'Asse. En outre, les modèles de culture ne sont pas exhaustifs sur les cultures maraichères ni arboricoles en plus des PAPAM. Il est possible de modéliser la fraise, le raisin, la laitue, la tomate, mais les cultures arboricoles sont quasiment absentes. Il faudrait donc améliorer les outils ou trouver un outil spécialisé sur ces cultures.

De plus, nous avons considéré que l'efficacité de l'utilisation de l'eau est toujours de 100%, mais nous savons que selon les conditions climatiques, cela peut changer drastiquement et impacter les dynamiques de modélisation. Si l'efficacité augmente, le rendement peut varier faiblement alors même que la disponibilité en eau diminue. La prise en compte de cet effet reste donc à approfondir.

Le travail que nous avons réalisé dans ce stage doit être couplé avec un travail de prospective plus complet prenant en compte les enjeux politiques et sociaux impliqués par le choix de changer l'assolement de ses parcelles. Ce stage est effectivement un stage exploratoire pour la recherche de tendance et outils mais n'a pas de prétention à dire quels sont les meilleurs scénarios d'assolement pour les PTGE. De plus, la stratégie d'évolution de l'assolement à l'échelle d'un bassin versant ne dépend pas uniquement des données modélisées ici. Il faut rajouter une analyse socio-économique et environnementale.

ANNEXES

Annexe 1 : Acronymes

ACS : Agriculture de conservation des sols

CA : Chambre d'agriculture

DCE : Directive cadre sur l'eau

DOE : débit objectif d'étiage

ETM : Evapotranspiration maximale

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

GES : Gaz à Effet de Serre

GIRE : Gestion intégrée de la ressource en eau

Kc : Coefficient cultural

LAI : surface foliaire

OAD : Outils d'aide à la décision

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Food and Agriculture Organization of the United Nations

PAPAM : plantes aromatiques à parfum et médicinales

PGRE : Projet de gestion de la ressource en eau

PO : Pyrénées Orientales

PTGE : Projet de territoire pour la gestion de l'eau

RHR : Réseau Hydraulique Régional

Besoin en eau : la plante a un besoin en eau qui est vital à ses fonctions. Ici, on parle de la nécessité de la plante à recevoir de l'eau. Dans le cas des « **besoins en eau d'irrigation** », il s'agit par contre du volume d'eau nécessaire pour irriguer la plante dans le cadre du stage, c'est-à-dire en cherchant le volume idéal que doit recevoir la plante pour atteindre un rendement maximum selon les modèles de culture. Il faut donc différencier les besoins en eau d'irrigation avec les besoins vitaux pour la survie de la plante. Les besoins en eau d'irrigation sont ici un besoin d'eau pour une culture menée à l'optimum, c'est-à-dire qu'ils correspondent à un confort hydrique maximum.

DRIAS : Les données DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>) sont les données simulées de projections climatiques futures à partir de plusieurs modèles climatiques. DRIAS est un produit du domaine public de Météo-France qui a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées. Les données DRIAS sont des données journalières et maillées sur la même grille de 8 km x 8 km du système SAFRAN. Cette base de données couvre la période 1958-2100, données de projection du climat par simulation à l'aide du modèle climatique CNRM-ALADIN et sous trois scénarios futurs RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5.

PRELEVEMENTS REELS ET PREVISIONNELS : Les prélèvements réels et prévisionnels sont des données qui nous ont été fournies par les partenaires. Les prévisionnels sont souvent calculés de façon à prévoir le pire scénario climatique. Si la demande est trop grande, des interdictions de prélèvements vont aussi affecter les volumes prévisionnels. Le prélèvement réel est mesuré à la borne. Il n'est pas associé à une culture spécifique, contrairement au prélèvement prévisionnel qui se base sur les cultures et les surfaces déclarées par les agricultures.

SAFRAN : Les données SAFRAN (*Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige*) sont des données météorologiques journalières historiques. Les données climatiques délivrées par SAFRAN sont des données journalières de réanalysées à la maille Safran (8 km x 8 km, à l'échelle de la France entière, environ 9000 mailles) à partir des observations locales réalisées quotidiennement à l'intérieur des mailles. Cette base est mise à jour chaque année.

SFN : Les Solutions fondées sur la Nature sont des actions qui s'appuient sur les écosystèmes pour relever les défis que posent les changements globaux à nos sociétés comme la lutte contre les changements climatiques, la gestion des risques naturels, la santé, l'approvisionnement en eau ou encore la sécurité alimentaire.

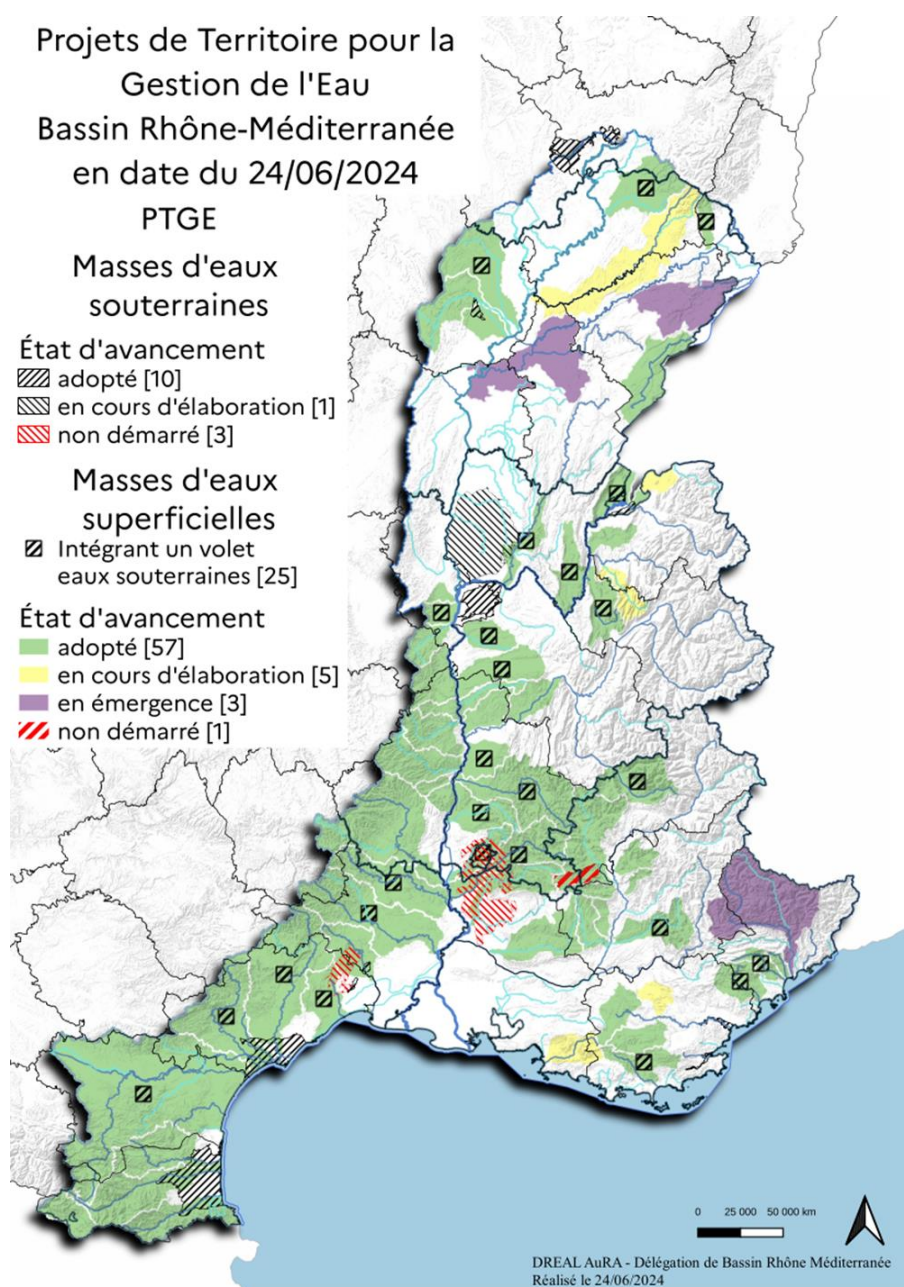


Figure 19 : Carte d'avancement des PTGE sur le bassin Rhône-Méditerranée. Source : (Projets de Territoires pour la Gestion de la ressource en Eau (PTGE) | L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée, s. d.)

Démarches concertées de gestion de l'eau

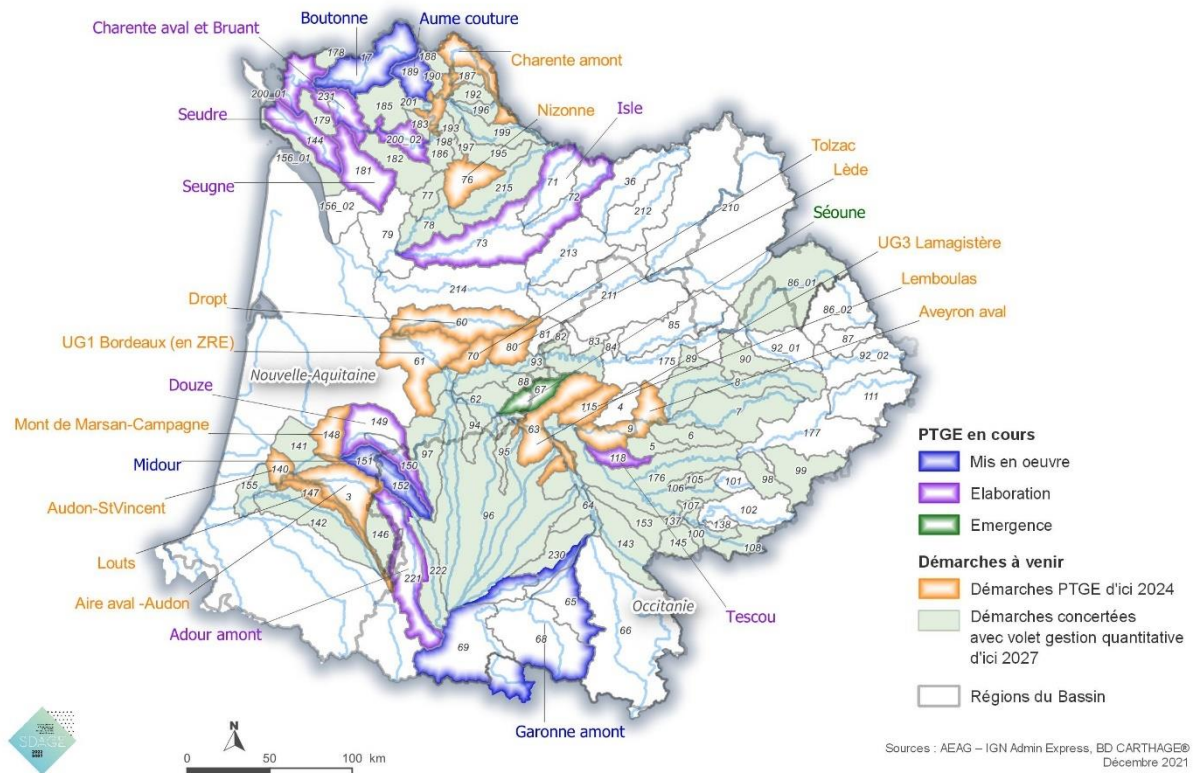


Figure 20: Les PTGE et autres démarches concertées de la gestion de l'eau dans le bassin Adour Garonne (Source : SIEAG - Portail des Données sur l'Eau du Bassin Adour-Garonne)

Echelle nationale

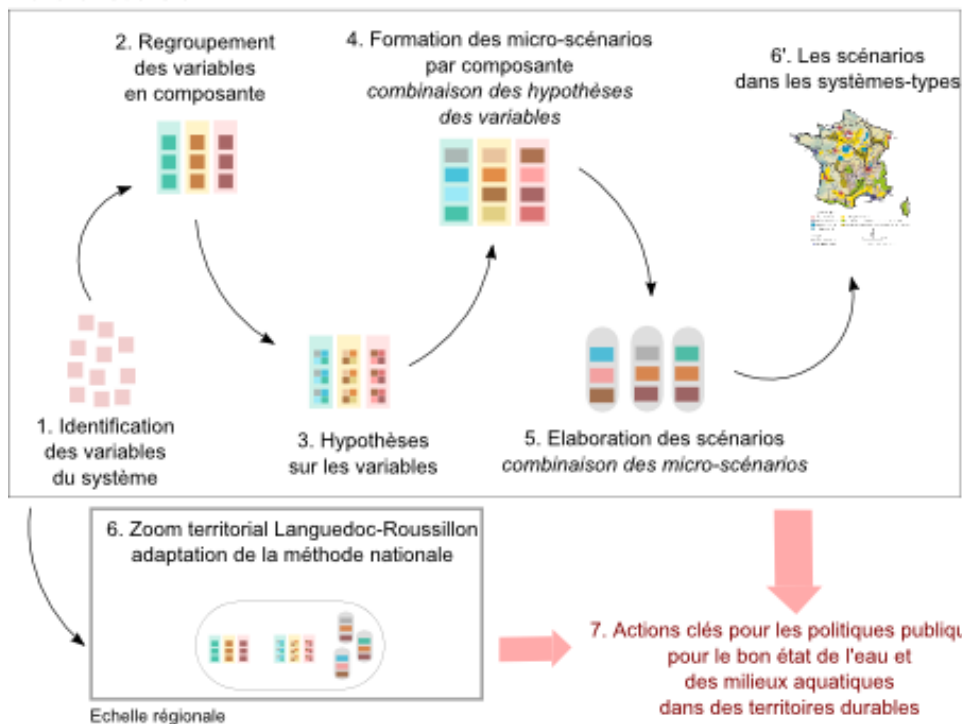


Figure 21 : La démarche prospective du projet « Aqua 3030 » (Source : Commissariat Général au développement durable, 2013)

Projet prospectif / PTGE	Outils prospectifs			Scénarios mis en place
	Modèles et OAD mentionnés		Indicateurs mentionnés	
	OAD	Modèles de culture		
Guide d'élaboration des PTGE				Scénario de référence (scénario sans projet), scénario de sobriété et avec variation de l'assolement, scénario de satisfaction économique des usages.
PTGE Serein-Armançon	Modélisation des débits d'étiage: PREMHYCE, Aqwi-FR, Gr4J et chaîne Safran-Isba-Modcou. Utilisation des données climatiques DRIAS et SAFRAN			
PTGE de la Boutonne		Optimisation d'assolement en système irrigué : modèle LORA. Irré-Lis pour l'expertise en irrigation.		
PTGE Aume-couture	Outil HYDRIM pour la gestion collective de l'irrigation			
PGRE-PTGE Asse et Largue-Calavon	Sisterre: modéliser les performances culturales. Réalisation de jeux sérieux pour la communication entre acteurs	ASALEE, simuler des stratégies d'assolement. Moderato, idem mais spécialisé dans le maïs		
Varenne de l'eau		Optirrig et Aquacrop, simulent rendement et besoins en eau d'irrigation		
PGRE du Buëch			Évolution du nombre et dates des gelées tardives et gelées noires	
LACCAVE	Walis : bilan hydrique d'une parcelle de vigne.			
TALANOA		SIMETAW, pour l'estimation des besoins en eau		
Projet "Vers des systèmes de culture adaptés au changement climatique"		Optirrig et AquaCrop	Indicateurs climatiques classiques + évolution du nombre de jours de gel, des chaleurs extrêmes, déficit hydrique	
Prospective menée par la CA66	Outil simple de mesure du bilan hydrique (Calculateur Excel)			
Aqua 2030				Scénario tendanciel, scénario technologies douces avec évolution de l'assolement, scénario basé sur les nouvelles technologies, scénario de crise ou l'économie prime et un scénario solidaire où les préoccupations environnementales priment.
Explore 2070	Sisterre, modéliser les performances culturales. Réalisation de jeux sérieux pour la communication entre acteurs	STICS, modèle de culture à tâches multiples		
Charente 2050				Scénario tendanciel ("réglementaire"), scénario de libéralisation des marchés de l'eau, scénario de remise en question et relocalisation agricole, scénario de gestion globale, avec l'aide de nouvelles technologies.
Garonne 2050				Trois scénarios consistant à la compensation minimale, partielle ou complète des déficits hydriques créés par le changement climatique.

Projet "Life, eau et Climat			Évolution de l'humidité des sols, fréquence évènements climatiques extrêmes (pluie, températures, enneigement, variation dans la phénologie)	
Autres guides et rapports disponibles	Simult'eau, Maelia et Wasabi pour le calcul de bilans hydriques à l'échelle de bassin versant. STRATEAU pour la prospective sur les tensions en lien à l'eau. WaLIS, bilan hydrique des parcelles de vigne. CERES, APSIM, CropSyst aussi pour le bilan hydrique des parcelles.	CropWat pour le calcul des besoins en irrigation	Rapport ETR / ETM et évolution du Kc	

Tableau 10 : Récapitulatif des outils, indicateurs et modèles utilisés par les projets prospectifs pour mettre en place des scénarios prospectifs en lien à la ressource en eau en France.

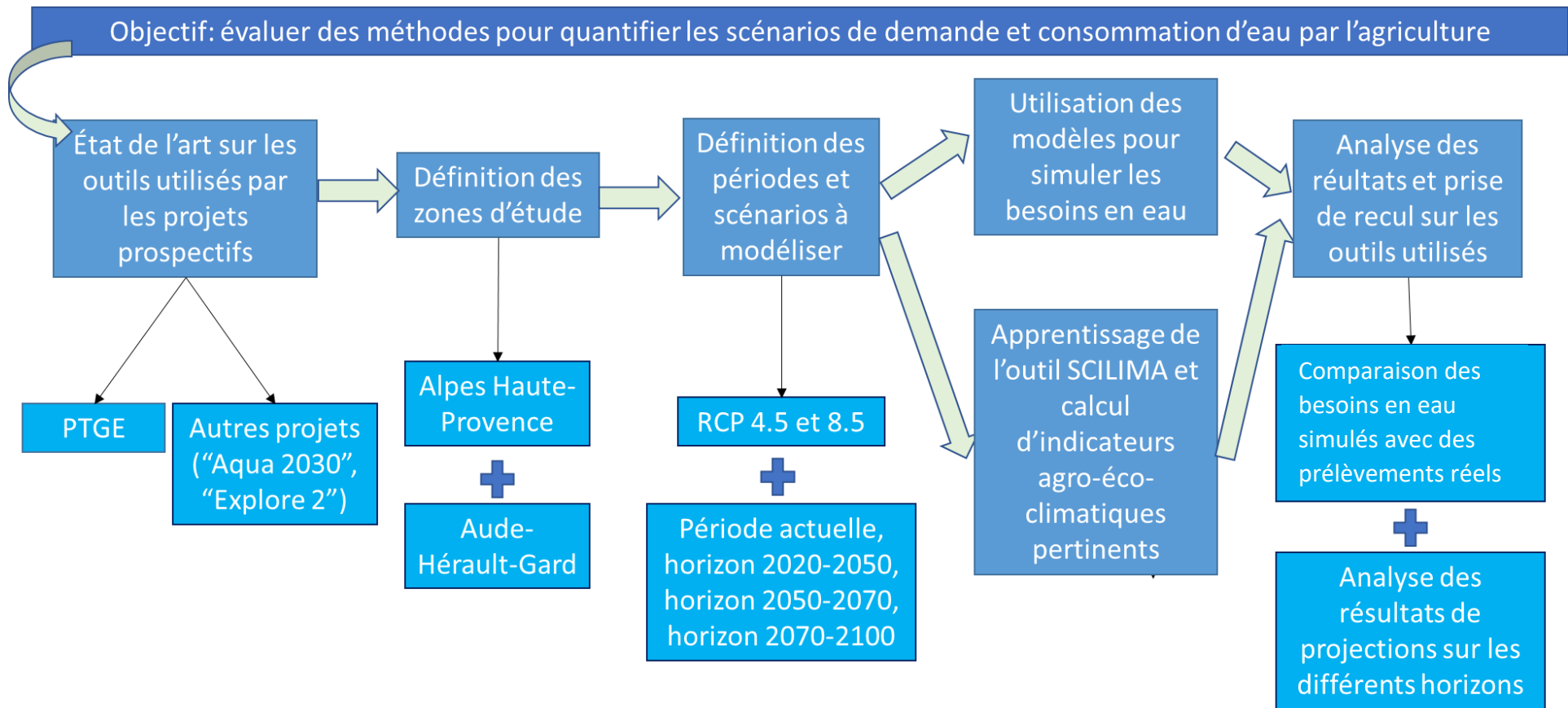


Figure 22: Logigramme schématisant les objectifs du stage de façon chronologique.

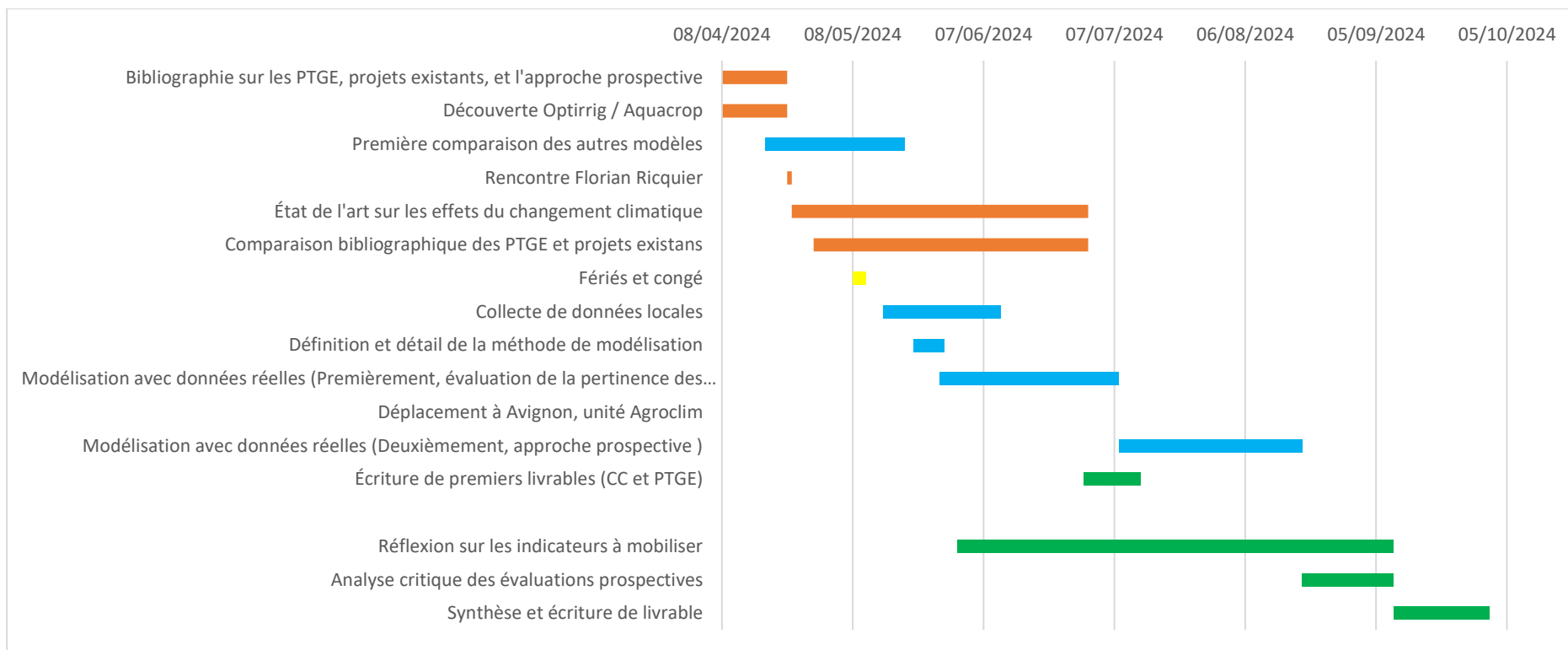


Figure 23: Diagramme de Gantt pour la réalisation des différentes étapes du stage

Aide à la décision & Modélisations complexes	Aide au choix d'assolement Asalée (Inrae, Terres Ino. Chambres Agri...)	
	Gestion des réseaux d'eau <u>Captages d'eau non autorisés</u> Projets recherche (DIANA, IPSTERS, WODA) <u>Optimisation des réseaux</u> <u>Prélèvements</u> IryQua (Aquasys)	
Cartographie d'occupation du sol OSO (Theia) Carte surfaces irriguées (Theia, MEOSS) Evènements d'irrigation (Theia)	Aide à l'irrigation ■ <i>modèle de bilan hydrique OU</i> <i>modèle basé sur de la donnée terrain</i> <u>Volume et Date d'irrigation à apporter</u> 365 HYD (Oenoview) Abelio ■ AquaCrop (FAO) ■ Aqualis (Agralis) Aquatool AqYield (Inrae) ■ BHYP (CA31) ■ Ceres Imaging Cropwin (ITK) ■ DemandeSide Instruments Eaucapi (INRAE, IFV) Field Net Advisor ■ Hydroscore (Vegetal Signals) Irricrop (Sencrop) Irré-lis / Irrinov (Arvalis) ■ Irribet (ITB) ■ Irrig Assistant (Corhize) ■ Irrisage (Cesbio) Maïseo Moderato ■ Moustics (Inrae) ■ Net-Irrig (CA Loiret / Seabex) ■ Netmaiz (Netafim) Opt'irrig (Inrae) ■ Preciel (ACMG, Cesbio...) SAMIR/SAFYE (Cesbio) ■	
Aide aux réglages du matériel d'irrigation <u>Buses et pompes d'irrigation</u> Apply Yourself <u>Maintenance prédictive</u> <u>Programme irrigation</u> BRL AG Heliopas AI MySolem	SatIrr (CNRS) ■ Sowater (Sowit) Vintel (ITK) ■ Xilem (Vivelys) Wago (Terranis) ■ Weedriq (Weenat) ■	
Prévisions climatiques Arome/Arpège (Météo France) ACZ (AgriAdapt) DRIAS IFS Hydroclimat <u>Incertitudes</u> Alea Pluie (ACTA)	Modélisations complexes	Modèle hydrologique Hydrus 1D Maelia SWAT Serious game C3PO Simulteau (Inrae)

Figure 24 : Les outils numériques pour la gestion de l'eau en agriculture (Source : Aspexit)

CULTURE	Date	Jour julien	Date	Jour julien	Source
	Jour de début	Jour julien	Jour de fin	Jour julien	
BETTERAVE	29-mars	89	04-sept	248	(Betteraves à sucrière - Date de semis – Semis – Expertise - KWS Benelux B.V., s. d.)
BLE DUR	15-févr	46	24-juin	176	(Blé dur, 2024)
BLE DUR HIVER	28-oct	302			(Blé dur, 2024)
BLE TENDRE	15-oct	289			(Comment conduire un blé tendre de printemps ?, 2024)
LUZERNE	30-sept	274	12-mai	498	(Réussir l'implantation d'une luzerne, 2017)
MAIS	05-juin	157	07-oct	646	(Semis tardifs de maïs, 2024)
ORGE HIVER	10-nov	315			(Sud-Ouest - Orge d'hiver, 2024)
ORGE PRINTEMPS	25-févr	56	24-juin	541	(Marguerie, 2017)
SOJA	15-mai	136	07-août	585	(Perrein, 2020)
SORGHO	17-avr	108	19-août	232	(Sorgho, 2023)
TOMATE	15-mars	75	06-août	584	
TOURNESOL	28-mars	88			(Culture du tournesol)
VIGNE	30-mai	151	29-mai	515	

Tableau 11 : Dates de semis et de récolte utilisés pour la modélisation

CULTURE	2019 (Année médiane)	2022 (Année sèche)	2023 (Année humide)
BETTERAVE	450	440	480
BLE DUR	150	190	170
BLE DUR HIVER	450	490	490
BLE TENDRE HIVER	460	460	490
COLZA HIVER	530	500	560
LUZERNE	240	200	260
MAIS	420	380	420
MARAICHAGE	300	310	340
ORGE HIVER	80	60	80
ORGE PRINTEMPS	270	290	300
SOJA	500	340	580
SORGHO	300	380	340
TOURNESOL	270	230	300

Tableau 12: Besoins en eau optimaux d'irrigation modélisés avec STICS sur le bassin versant de l'Asse.

Culture	Année médiane	Année sèche
BLE DUR	145	230
LUZERNE	235	310
MAIS	395	500
MARAICHAGE (TOMATE)	295	375
ORGE PRINTEMPS	280	350
SOJA	290	375
SORGHO	325	405
TOURNESOL	275	335
VERGER	420	550
VIGNE	75	115

Tableau 13 : Besoins en eau par culture issus du référentiel des besoins en eau d'irrigation de la région PACA

Consommation mm	ANNEE		
	2010(médiane)	2022(sèche)	2018(humide)
BLE DUR	239.7	329	157.3
MAIS	500.5	500.5	501
MARAICHAGE	529	675	470
SORGHO	432	447	410
TOURNESOL	438	586	410
VIGNE	145	190	99

Tableau 14 : Besoins optimaux d'irrigation modélisés par Cropwat pour différentes cultures sur la zone d'étude Aude-Hérault-Gard

Culture	Année médiane	Année sèche	Année humide
BLE DUR	139	220	93
CULTURES FOURRAGERES	450	590	350
MAIS	473	529	416
MARAICHAGE	395	441	352
SORGHO	341	395	284
TOURNESOL	309	356	271
VIGNE	Pas	de	données

Tableau 15 : Besoins en eau issus du référentiel des besoins en eau d'irrigation BRLi, tirés de la station Montpellier

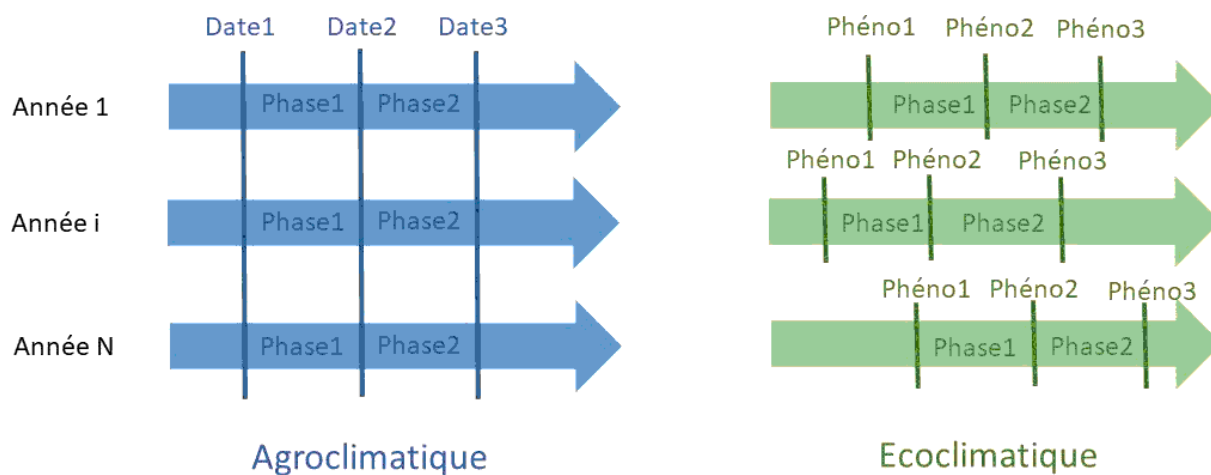


Figure 25 : Schéma expliquant les différences entre indicateurs agro climatiques et éco climatiques

Plante	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	Culture sur deux ans
Blé et blé dur	Semis = 1er octobre	Levée	Épi 1 cm ¹	Surface foliaire Maximale ²	Début de Remplissage du grain ³	Maturité physiologique ⁴	-	Oui
Maïs	Semis = 10 avril	Levée	8 feuilles	Méiose	Floraison	32% MS Plante entière Récolte Maïs Fourrage	Maturité physiologique	Non
Pomme de terre	Plantation	Levée	Début de tubérisation	Début de grossissement des tubercules	Maturité des tubercules	-	-	
Vigne	Entrée en dormance = 1er août	Sortie de dormance	Débourrement	Floraison	Véraison	Maturité physiologique	-	Oui

Tableau 16 : Description de chaque stade utilisé pour le calcul d'indicateurs sur Agroclim

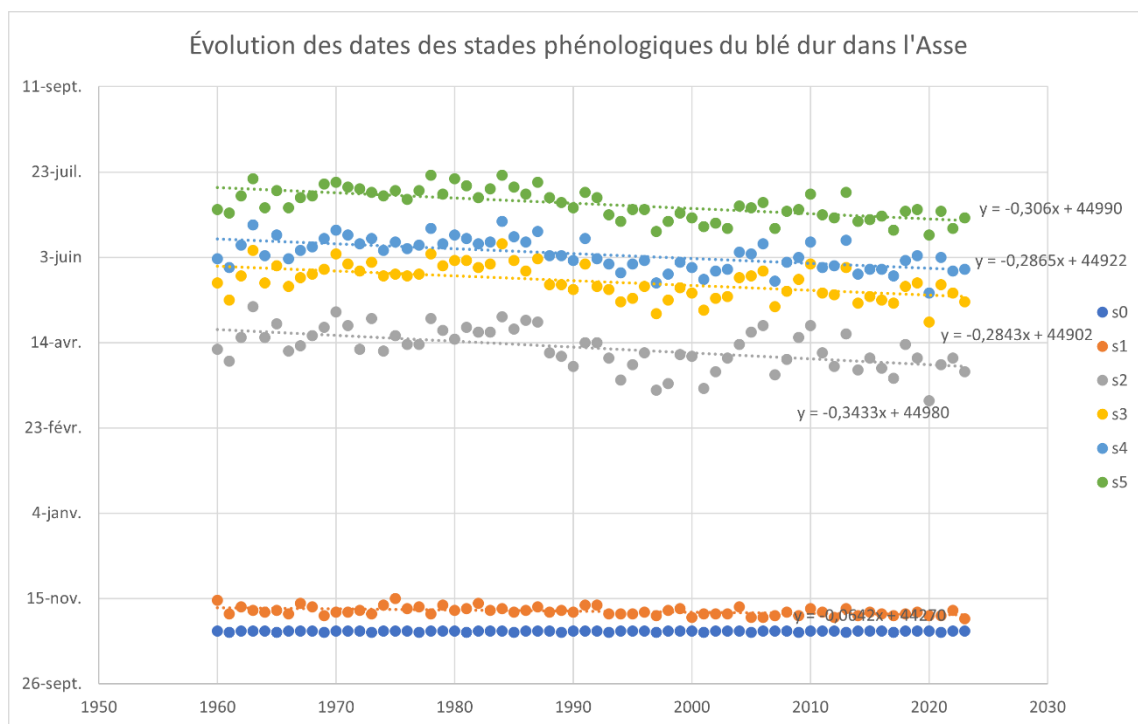


Figure 26 : Évolution des dates des stades phénologiques du blé dur dans la période 1960-2020 sur le bassin versant de l'Asse pour le RCP 4.5.

DATE_EFFECT	DATE_RESILIATION	Surface	CONSO_2015	CONSO_2016	CONSO_2017	CONSO_2018	CONSO_2019	CONSO_2020	CONSO_2021	CONSO_2022	CULTURE
01/11/2014	31/10/2016		915	0	0						VIN DE PAYS
01/11/2016		2.435			2328	1694	4170	4517	1	2896	VIN DE PAYS
01/11/2016		3.326			2732	4263	5785	1545	0	0	VIN DE TABLE
01/11/2015		7.41		6963	7746	8603	14507	10693	2871	8660	VIN DE PAYS

Tableau 17 : Extrait des données de prélèvements réels d'eau d'irrigation aux bornes sur la zone Aude-Gard-Hérault

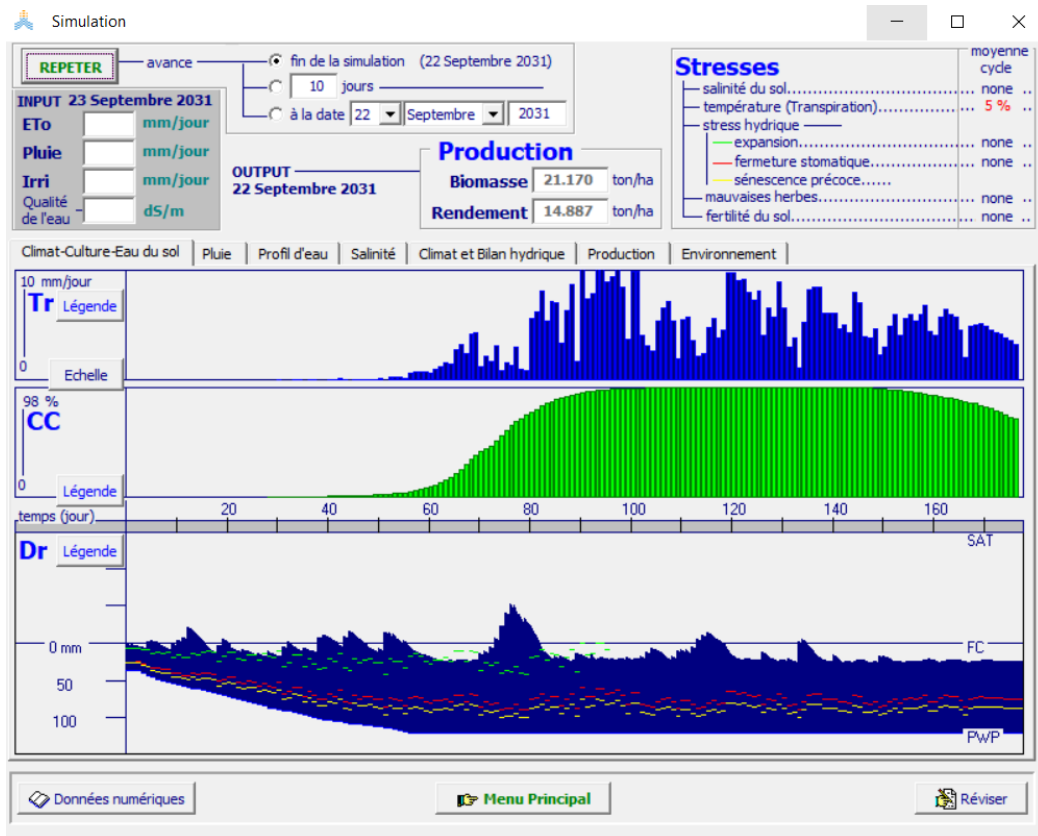


Figure 27 : Exemple d'interface de modèle de culture après modélisation d'une culture de betterave, année 2031. Tr : transpiration, CC : Surface foliaire, Dr : Épuisement de la zone racinaire.

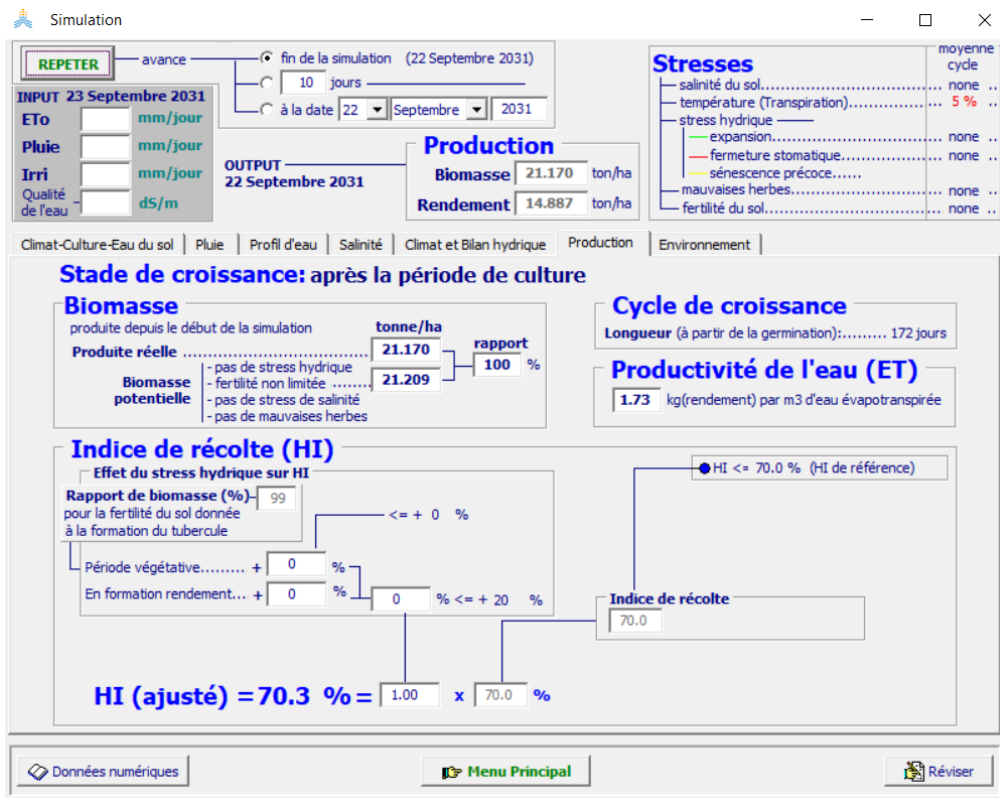


Figure 28 : Exemple d'interface de modèle de culture après modélisation d'une culture de betterave, année 2031. Résultats de production.

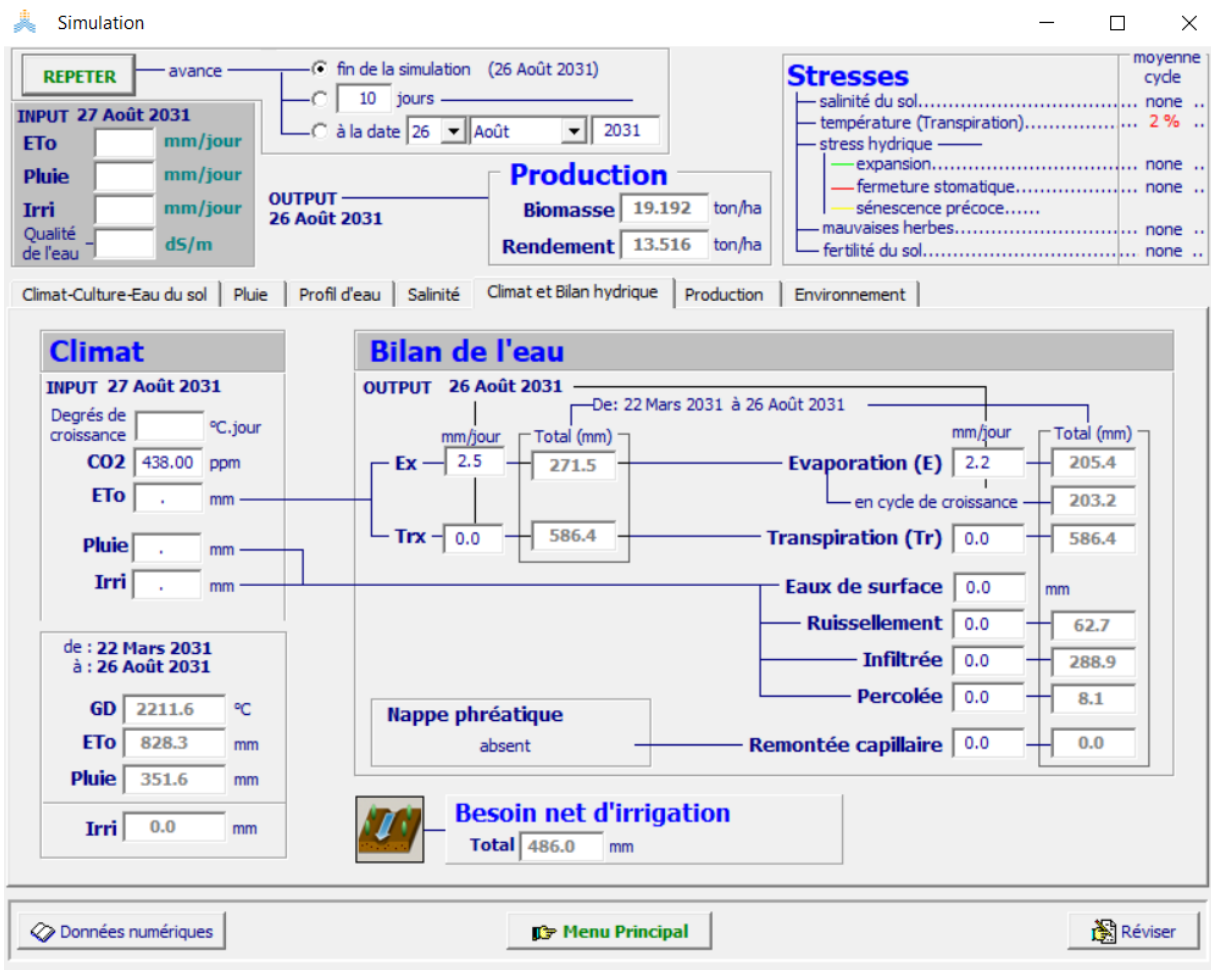


Figure 28: Exemple d'interface de modèle de culture après modélisation d'une culture de betterave, année 2031. Résultats sur le bilan hydrique.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'eau Adour Garonne. (2010). *Garonne 2050*. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-21600-rapport-final-garonne-2050.pdf>
- Aleksovska, I. (2020). *Améliorer les prévisions à court et moyen termes des modèles agronomiques en prenant mieux en compte l'incertitude des prévisions météorologiques*. https://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/academiciens_écrivent/2021/20210415theseivanaaleksovsk_a.pdf
- AquaCrop | Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). <https://www.fao.org/aquacrop/com>
- ARTELIA. (2022). *Pièce 5 : Document d'incidence sur la ressource en eau*. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://document.s.projets-environnement.gouv.fr/2022/05/20/D000000388/fichierEtudeIncidence.pdf&ved=2ahUKEwiNjv-w87SIAxUwSqQEHYfRNOoQFnoECCIQAQ&usq=AOvVaw19rtMqL4S5qeBCA4qTIljz>
- Ayat-Allah Bouramdane. (2022). *Agrivoltaïque, de quoi parle-t-on au juste ?* <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7594342>
- Beaudoin, N., Ripoche-Watcher, D., Strullu, L., Mary, B., Launay, M., & Justes, É. (2023). *Stics Soil Crop Model—Conceptual Framework, Equations and Uses*. Librairie Quae. <https://www.quae.com/produit/1809/9782759236794/stics-soil-crop-model>
- Besoins en eau : Combien consomment les cultures ?* (2024, avril 1). Perspectives Agricoles. <https://www.perspectives-agricoles.com/conduite-de-cultures/modelisation-des-besoins-en-eau-combien-consomment-les-cultures>

Betteraves à sucrière—Date de semis – Semis – Expertise—KWS Benelux B.V. (s. d.). Consulté 11 septembre 2024, à l'adresse <https://www.kws.com/be/fr/expertise/semis/date-de-semis/betteraves-a-sucre/>

Blé dur : Les dates et densités de semis recommandées selon les variétés. (2024, juillet 22). ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-dur-des-rythmes-de-developpement-differents-selon-la-variete>

Cain, A.-H. (2022). *Les fiches techniques du réseau GAB*. INRAE.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.agrobio-bretagne.org/voy_content/uploads/2023/02/Web_48-ARBO_GEL.pdf&ved=2ahUKEwjaxvu5jdCIAxVNVKQEHcj2L1QQFnoECCoQAQ&usg=AOvVaw1S ys0LFNL06CvbsCTEZDQ4

Cellule Recherche Innovation Transfert de L'INRAE. (2022). *Quels leviers d'adaptation au changement climatique ?* <https://www.acta.asso.fr/wp-content/uploads/2022/09/Matrice-simplifiee-Leviers-dadaptation-aux-stress-hydrique-et-thermique-Version10juin2022.pdf>

Chambre d'agriculture Alpes de Haute-Provence, Arvalis, SCP, Duransia, & Institut Agro Montpellier. (2023). *Vers des systèmes de culture adaptés au changement climatique et ressources en eau contraintes en Haute-Provence.* <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/projet-de-recherche-cch2opaca>

Chambre d'agriculture des Hautes alpes, & SMIGIBA. (2019). *Plan de gestion de la ressource en eau du bassin versant du Buëch.* https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sites/sierm/files/content/2020-02/20191212-RAP-Pgre_Buech_vf.pdf&ved=2ahUKEwjum_6WoseIAxUISaQEHP1M20QFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw36eAscnd72pM1TGffvELZZ

Chambre d'agriculture Provence Alpes Côte d'azur. (2014). *Référentiel des besoins en eau d'irrigation des productions agricoles de Provence-Alpes-Côte d'azur.*

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://www.agrometeo.fr/fonddoc/Livret%2520BD.pdf&ved=2ahUKEwiepoKznsmlAxURdaQEHS2kJd8QFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw1u72JUEhSJWZpmZjGE5uP0>

Clarke, D. D. (1998). *CropWat : User Guide*.

Comité de Territoire Aume-Couture—EPTB Charente. (s. d.). Consulté 22 mai 2024, à l'adresse

<http://www.fleuve-charente.net/domaines/projets-de-territoire/espace-pro/3208-2>

Comment conduire un blé tendre de printemps ? (2024, janvier 18). ARVALIS.

<https://www.arvalis.fr/infos-techniques/comment-conduire-un-ble-tendre-de-printemps>

Commissariat général au développement durable. (2013). *Présentation du programme—Aqua*

2030—Territoire durable 2030—MEDDE. [http://www.territoire-durable-](http://www.territoire-durable-2030.developpement-durable.gouv.fr/index.php/td2030/programme/?id=aqua)

[2030.developpement-durable.gouv.fr/index.php/td2030/programme/?id=aqua](http://www.territoire-durable-2030.developpement-durable.gouv.fr/index.php/td2030/programme/?id=aqua)

CropWat. (2023). SDGHelpdesk. [https://www.fao.org/sustainable-development-goals-](https://www.fao.org/sustainable-development-goals-helpdesk/champion/article-detail/cropwat/en)

[helpdesk/champion/article-detail/cropwat/en](https://www.fao.org/sustainable-development-goals-helpdesk/champion/article-detail/cropwat/en)

Culture du tournesol : Tout savoir du semis à la récolte. (2024). LG Seeds France.

<https://www.lgseeds.fr/tournesol.html>

DDT des Alpes de Haute-Provence. (2018). *PLAN DE GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU Bassin*

versant : ASSE. file:///C:/Users/sotaleon/Downloads/PGRE_ASSE_VF-2.pdf

Documents—EPTB Charente. (s. d.). Consulté 9 septembre 2024, à l'adresse [https://www.fleuve-](https://www.fleuve-charente.net/domaines/charente-2050/documents)

[charente.net/domaines/charente-2050/documents](https://www.fleuve-charente.net/domaines/charente-2050/documents)

EPTB Charente. (2023). *Plan d'adaptation au changement climatique du bassin du fleuve Charente*.

<https://www.fleuve-charente.net/domaines/charente-2050/documents>

Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., & Hsiao, T. C.

(2017). AquaCrop-OS : An open source version of FAO's crop water productivity model.

Agricultural Water Management, 181, 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>

Gel et dégâts de gel sur vigne. (s. d.). IFV Occitanie. Consulté 20 septembre 2024, à l'adresse

<https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/gel-et-degats-de-gel-sur-vigne/>

Gis Sol » *Les réserves en eau utile de la France métropolitaine*. (s. d.). Consulté 9 septembre 2024, à l'adresse <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-reserves-en-eau-utile-de-la-france-metropolitaine-1483>

Graveline, N., Le Gallo, J., Loubier, S., & Touzard, J.-M. (2022). *Compte rendu Réunion de lancement & premier atelier du Projet Talanoa WATER*. INRAE. <https://www.vineas.net/medias/2a38466c-6538-481e-b64d-655e739076b8.pdf>

Hydrologie générale : Analyse fréquentielle. (s. d.). Consulté 17 septembre 2024, à l'adresse https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/annexes/AnalFrequ_rep.html

IRRIGUER LA VIGNE : POURQUOI ET COMMENT ? (s. d.). Consulté 20 septembre 2024, à l'adresse <https://www.netafim.fr/blog/irriguer-la-vigne--pourquoi-et-comment-/>

Les outils numériques pour la gestion de l'eau en agriculture. (2023, juillet 10). Aspexit.

<https://www.aspexit.com/gestion-de-leau-et-technologies-numeriques-en-agriculture/>

Marguerie, M. (2017). *Culture de l'orge en bio*.

Maugis, P., Valadier, F., & Piqueras, U. (2015). *STRATEAU, UN NOUVEL OUTIL DE PROSPECTIVE SUR LES TENSIONS SUR L'EAU – APPLICATION À LA RECONSTITUTION DES USAGES DE L'EAU EN FRANCE MÉTROPOLITAINE*.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.lsc.e.ipsl.fr/wp-content/uploads/2024/07/maugis-et-al_ReconstitutionUsagesEauFranceStrateau_LHB15.pdf&ved=2ahUKEwi395mW7bSIAXVGVaQEHXq2O-oQFnoECBYQAQ&usg=AOvVaw3ofZ9yN3M14xmPPIn8tiFm

Meilliez, F., Salvador, P.-G., Flajolet, A., Norrant, C., Salvador, P.-G., Masson, É., Delbecque, C., Manlay, A., & Parmentier, M. (2023). *Dossier La ressource en eau : État des connaissances et perspectives*.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://sgn.univ-lille.fr/fileadmin/user_upload/sgn/documents/CP_TaP_EAU/TAP-Dossier-Eau-ASGN-2023-

VNum.pdf&ved=2ahUKewjXqImn67SIaxVDcKQEHZuoDhUQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw1uB
HTOpFX_vhwuvn1LRZub

Mémento irrigation agricole—BRL. (s. d.). Consulté 26 août 2024, à l'adresse

<http://www.brl.fr/fr/memento-irrigation-agricole>

Ministère de la transition écologique. (2023). *Guide d'élaboration des PTGE*.

Ministère de l'agriculture. (2021). *Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique. Thématique 3*. <https://agriculture.gouv.fr/mots-cles/varenne-de-leau>

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, *463*(7282), 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Naulleau, A., Hossard, L., Prévot, L., & Gary, C. (2022). *Grapevine yield estimation in a context of climate change : The GraY model* [Conference_item]. Terclim 2022: Book of Abstracts; INRAE. <https://agritrop.cirad.fr/601757/>

Perrein, A. (2020). *Fiche technique—Soja*.

Préparation des semis—Attendre le ressuyage des sols en profondeur avant d'intervenir. (2024, mars 7). ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/attendre-le-ressuyage-des-sols-en-profondeur-avant-d'intervenir>

Réussir l'implantation d'une luzerne. (2017, mars 16). ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/reussir-limplantation-dune-luzerne>

Robin, Y., Corre, L., Marson, P., Bernus, S., Vrac, M., & Thao, S. (2023). *PROJECTIONS CLIMATIQUES RÉGIONALISÉES : CORRECTION DE BIAIS ET CHANGEMENTS FUTURS*. file:///C:/Users/sotaleon/Downloads/Explore2_Rapport_Climat1_VF.pdf

Sanderson, M., Santini, M., & Valentini, R. (2012). *Interactions forêts climat*.

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.res>

earchgate.net/profile/Arvind_Singh56/post/What_is_the_relationship_between_forest_and
_Climate_Change/attachment/5a8900d54cde266d588bdf24/AS:595241686032384%401518
928085177/download/EU_Forests_annex1.pdf&ved=2ahUKEwiYqcyMrtCIAxXOSaQEHVjNNC
EQFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw35NEXDOu90cht_rsKpoZ8Q

Sauquet, E., Chatel, T., & Martin, E. (2019). *Vers l'élaboration de nouvelles projections hydro-climatiques pour les stratégies d'adaptation au niveau des bassins versants français* [Research Report]. Inrae ; Irstea. <https://hal.science/hal-02930768>

SDES. (s. d.). *Évolutions de la ressource en eau renouvelable en France métropolitaine de 1990 à 2018*.

Semis tardifs de maïs : Opter pour la bonne précocité variétale afin de limiter les risques à la récolte.

(2024, mai 25). ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/semis-tardifs-de-mais-opter-pour-la-bonne-precocite-varietale-afin-de-limiter-les>

Shirish, P., Kelkar, S., & Bhalerao, S. (2013). Mulching : A Soil and Water Conservation Practice. *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences*, 1, 2320-6063.

SIEAG - Portail des Données sur l'Eau du Bassin Adour-Garonne. (s. d.). Consulté 6 septembre 2024, à l'adresse <https://adour-garonne.eaufrance.fr/catalogue/64682a22-e007-4330-a027-743acb26d4cc>

Sorgho : Soigner la préparation du lit de semence et la qualité du semis. (2023, avril 29). ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/soigner-la-preparation-du-lit-de-semence-et-la-qualite-du-semis>

Stab, C., & Lafont, E. (2023). *Diagnosis of vulnerabilities to climate change for local water management*.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/Guide%2520m%25C3%25A9thodologique%2520diagnostic%2520des%2520vulnerabilites.pdf&ved=2ahUKEwjQvLPQ9bSIAxU6fKQEHQJ0ADMQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw35yBwKAFIkKKeBJQfdFIZJ

Sud-Ouest - Orge d'hiver : Téléchargez nos préconisations pour les semis 2024. (2024, août 9).

ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/orge-dhiver-telechargez-nos-preconisations-pour-les-semis-2024>

V'innopole. (2013). *La Grappe d'Autan, n°95*. https://www.vignevin-occitanie.com/wp-content/uploads/2018/11/LaGrappe_95.pdf

wpActiSol. (2024, juin 12). Comment fonctionne le mulching en agriculture ? *ACTISOL*. <https://actisol-agri.fr/comment-fonctionne-le-mulching/>