

Développement d'un modèle couplé agro-hydrologique - application au bassin versant de l'Hérault

Myriam Soutif-Bellenger

▶ **To cite this version:**

Myriam Soutif-Bellenger. Développement d'un modèle couplé agro-hydrologique - application au bassin versant de l'Hérault. Hydrologie. 2020. hal-03266241

HAL Id: hal-03266241
https://hal.inrae.fr/hal-03266241

Submitted on 21 Jun 2021

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

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

Sorbonne Université

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie

Mention Sciences de la Terre, des Planètes et de l'Environnement

Parcours Hydrologie, Hydrogéologie et Géochimie Environnementale

Développement d'un modèle couplé agro-hydrologique - application au bassin versant de l'Hérault

Myriam Soutif--Bellenger

Directeurs de recherche : Lila Collet, Guillaume Thirel

Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Antony)

19/06/2020

Abstract

As we move into Anthropocene Epoch, tensions on water resources are increasingly high on a global scale, and particularly in the Mediterranean region. Agriculture shows a very high vulnerability to climate change : the rise in temperatures increases evapotranspiration, leading to both a decrease in water resources and an increase in crop water demand. To quantify agriculture vulnerability in a given territory, an impact modelling chain, forced with climate data, can be developed, informing on the capacity of a watershed to meet future water demand. However, depending on the greenhouse gas emissions scenarios and models used in the impact modelling chain, results may be different, illustrating the uncertainty related to any modelling and simulation work.

In this study, a coupled hydrological and agronomic approach was developed on the upstream Hérault catchment (metropolitan France), a typical Mediterranean catchement. Irrigation withdrawals were simulated with the single coefficient FAO model (Allen et al., 1998), while flow rates were simulated using the lumped hydrological GR5J model (Le Moine et al., 2008). At daily time step, flows at the outlet of the sub-basins considered were subject to irrigation withdrawals, within the limit of available flow. This coupled modelling was subjected to the climate of the 1960-2018 period, and based on the observed cropped areas of year 2010. This experiment allowed to question the ability of the model to represent the capacity of the watershed to meet crop water demand, and the effects of withdrawals on flows in a climate change context and over a long time period. The parcimony of the chosen hydrological and agronomic models allowed performing numerous simulations with different sets of parameters, and thus obtaining a more exhaustive picture of possibilities. Based on our simulation assumptions, water withdrawals tend to increase from 11,700 to 17,160 m^3 per year on Gignac sub-basin, along with a trend towards decreasing river flows, resulting in an increasing difficulty in meeting the irrigation water demand.

The use of several hydrological and agronomic models could lead to a better estimate of modelling uncertainty. Ultimately, the approach developed can be used to evaluate the vulnerability of watersheds to climate change, and to test the efficiency of adaptation strategies.

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes encadrants, Lila Collet et Guillaume Thirel, pour leur appui scientifique, leurs nombreuses relectures, leur sérénité, leur disponibilité, autant de qualités qui ont permis de m'orienter dans le labyrinthe de la recherche.

Je remercie ensuite l'équipe pédagogique de Sorbonne Université : Nicolas Le Moine, Guillaume Morin, qui m'ont apporté les connaissances et savoir-faire pour mener mes travaux de stage. Plus généralement, je remercie les services administratifs pour leur gestion de la crise du coronavirus, permettant le maintien du stage dans de bonnes conditions.

De plus, je remercie l'ensemble de l'équipe HYDRO et les membres de l'unité de recherche HYCAR d'INRAE Antony : Charles Perrin, Vazken Andréassian, Olivier Delaigue, stagiaires, etc., tant pour leur aide et soutien pendant le montage du dossier de thèse et pour la réalisation des travaux du stage, que pour leur adaptabilité, leur bonne humeur et créativité, qui m'ont donné le courage et l'envie de travailler même en temps de confinement.

Je remercie de plus le Corps des Ingénieurs des Ponts, des Eaux et des Forêts pour m'avoir autorisée à me former en Hydrologie, et à poursuivre mes projets scientifiques en thèse. Je remercie en particulier Alexandre Péry pour son appui lors de la candidature à la Formation Complémentaire par la Recherche.

Je remercie mon compagnon Camille, d'avoir été un très bon collègue de bureau/salon durant le confinement, et de m'avoir soutenue et de me soutenir encore pour mes aspirations scientifiques et professionnelles.

Bien évidemment, je remercie tous les travailleurs qui aidé au maintien des activités essentielles, et qui m'ont donc permis de travailler à l'abri de toute inquiétude.

Table des matières

Table des Figures **5**

Liste des Tableaux **5**

1 Introduction **6**

2 État de l'art : apport de la modélisation pour les études d'impact du changement climatique **6**
2.1 Chaîne de modélisation d'impact 6
2.2 Prise en compte des incertitudes par l'approche ensembliste 7
2.3 Modélisation de la ressource en eau 7
2.4 Modélisation de la demande en eau agricole 9
2.5 Couplage des modélisations de la ressource et de la demande en eau 10

3 Matériel : zone d'étude et données disponibles **11**
3.1 Présentation de la zone d'étude 11
3.2 Données hydro-climatiques 12
3.3 Données agronomiques 12

4 Méthodologie **14**
4.1 Méthodologie de modélisation hydrologique 14
4.2 Méthodologie de modélisation agronomique 15
4.3 Méthodologie de couplage agro-hydrologique 18
4.4 Essai du modèle sur la période historique 19

5 Résultats **20**
5.1 Résultats de la modélisation hydrologique du bassin versant 20
5.2 Résultats de la modélisation de la demande en eau agricole 21
5.3 Résultats du couplage agro-hydrologique 24

6 Discussion **25**
6.1 Analyse des résultats 25
6.2 Les apports de la modélisation développée dans le mémoire 27
6.3 Limites et perspectives d'amélioration de la modélisation développée 28

7 Conclusion et perspectives **30**

8 Bibliographie **31**

Annexes **34**
A Données d'entrée 34
B Fonctionnement du modèle agronomique 36
C Résultats de la modélisation 37

Table des figures

1 Chaîne de modélisation d'impact du changement climatique sur la ressource en eau et l'agriculture . . . 7
2 Flux hydriques considérés pour la modélisation hydrologique . . . 8
3 Les différentes évapotranspirations, selon les facteurs pris en compte . . . 9
4 Bilan en eau au niveau des sols cultivés . . . 9
5 Localisation et organisation géographique du bassin versant de l'Hérault . . . 11
6 Hydrologie du bassin versant de l'Hérault . . . 12
7 Régime du débit, des précipitations et de l'évapotranspiration sur le bassin versant de l'Hérault à Gignac . . . 12
8 Paysage agricole par sous-bassin versant étudié . . . 13
9 Modélisation hydrologique de la zone d'étude . . . 14
10 Courbes de K_C pour les différentes cultures simulées . . . 15
11 Bilan en eau journalier du sol par CropWat . . . 16
12 Agrégation spatiale et temporelle du couplage agro-hydrologique . . . 19
13 Graphes d'évaluation de la modélisation hydrologique . . . 20
14 Comparaison des prélèvements simulés et des prélèvements déclarés . . . 21
15 Demande en eau et moyenne mensuelle . . . 23
16 DEI annuelle simulée et tendance selon le paramétrage de la FAO et de BRL . . . 24
17 Coefficient des droites de régression des K_S moyens annuels . . . 24
18 Évolution de la moyenne annuelle du rapport I/Q sur le bassin de l'Hérault à Gignac . 24
19 Effets des prélèvements simulés sur les débits pour l'ensemble des simulations . . . 25
A.1 Climat du bassin versant de l'Hérault . . . 34
B.1 Etapes de calcul du bilan en eau journalier par CropWat . . . 36
C.1 Evolution des débits moyens du mois d'août sur la station de l'Hérault à Gignac . . . 37
C.2 Effets moyens de la variation des paramètres du modèle agronomique sur la DEI . . . 38
C.3 Tendance de la DEI et des Ks (cultures non irriguées) sur tous les sous-bassins . . . 39
C.4 Moyennes annuelles des rapports I/Q journaliers sur tous les sous-bassins . . . 40
C.5 Impact des prélèvements sur les débits sur les sous-bassins . . . 41

Liste des tableaux

1 Protocole de test de sensibilité du modèle agronomique . . . 18
2 Comparaison de l'irrigation annuelle simulée moyenne aux doses recommandées par BRL . . . 22
A.1 Profondeur de racines et facteur de puisement pour les cultures présentes sur le bassin 34
A.2 Période de démarrage du cycle cultural par culture irriguée . . . 35
A.3 Propriétés du sol du bassin versant de l'Hérault . . . 35
B.1 Résumé des règles d'irrigation retenues par culture . . . 37
C.1 Performance des calages obtenues sur les différents sous-bassins étudiés . . . 37

1 Introduction

Comme le réaffirme le 5e rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (IPCC, 2014), le réchauffement climatique est aujourd'hui une réalité observée causée par l'activité humaine, et se poursuivra au cours du 21ème siècle. Concernant la France, le projet Explore 2070 (Chauveau et al., 2013) a produit des projections hydrologiques dérivées de projections climatiques liées au 4e rapport du GIEC, estimant une diminution future de 10 à 40 % des débits moyens des cours d'eau sur la métropole. Les observations en France métropolitaine semblent bien s'inscrire sur ces projections, et une importante sécheresse a ainsi généralisé les restrictions d'eau sur l'ensemble de la métropole l'été dernier, avec jusqu'à 88 départements soumis à des arrêtés préfectoraux (MTES and MAA, 2019).

Si l'agriculture ne se positionne pas en tête des volumes prélevés en France, l'eau prélevée par ce secteur est majoritairement consommée par évapotranspiration, et donc non restituée au milieu. De plus, les prélèvements en eau pour l'agriculture en France sont les plus importants sur les mois de l'année susceptibles d'être en période de sécheresse. Ainsi, l'agriculture représenterait 48 % de la consommation d'eau annuelle nette, et 79 % en période estivale (Conseil d'Etat, 2010). Il convient ainsi d'évaluer la vulnérabilité du secteur agricole vis-à-vis de la ressource en eau en contexte de réchauffement climatique.

La zone méditerranéenne devrait être particulièrement impactée. Les projections climatiques globales futures identifient en effet le bassin méditerranéen comme l'un des points chauds du changement climatique (Giorgi, 2006), alors même que la demande en eau y a doublé au cours de la deuxième moitié du 20ème siècle, principalement à cause du développement de l'irrigation, et de l'augmentation de la démographie (Blinda et Thivet, 2009). La région méditerranéenne française n'est pas épargnée, et l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a ainsi déjà identifié les bassins les plus vulnérables sur son territoire (AERMC, 2014). Le bassin versant de l'Hérault, notamment, présente déjà un déficit systémique de sa ressource en eau par rapport à la demande, estimé à 350 l/s au mois d'août (Syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault, 2015).

Si l'existence du changement climatique n'est plus à démontrer, ses conséquences dans le futur présentent des incertitudes (Carroget et al., 2017), qui nécessitent d'être connues pour évaluer la vulnérabilité du secteur agricole et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation efficaces. Un moyen de répondre à ces incertitudes est d'utiliser une approche multi-modèle et multi-scénario, et ainsi représenter l'ensemble des futurs possibles (IPCC, 2007, 2014 ; Hawkins and Sutton, 2009 ; Chauveau et al., 2013 ; Sauquet et al., 2014). Une telle approche demande néanmoins du temps pour paramétrer les multiples modèles, et effectuer les nombreuses simulations. Il convient donc de sélectionner des modèles suffisamment performants et robustes, mais aussi parcimonieux, pour mettre en œuvre des études d'impact multi-modèle et multi-scénario de façon opérationnelle.

L'objectif général du mémoire est donc de mettre en place une méthode donnant des indicateurs permettant d'évaluer la vulnérabilité du secteur agricole au changement climatique vis-à-vis de la ressource en eau en contexte d'incertitude.

2 État de l'art : apport de la modélisation pour les études d'impact du changement climatique

2.1 Chaîne de modélisation d'impact

L'évaluation de la ressource en eau future peut se faire par une chaîne de modélisation d'impact (Fig. 1) : les scénarios d'émission de gaz à effet de serre forcent des modèles climatiques globaux et régionaux (Chauveau et al., 2013 ; Sauquet et al., 2014). Les sorties de ces modèles climatiques

servent ensuite de données d'entrée aux modèles hydrologiques pour produire des projections hydrologiques, soit une information sur la ressource en eau future d'un bassin versant. Elles peuvent également servir de données d'entrée aux modèles agronomiques qui calculent la demande en eau d'irrigation et le stress hydrique des cultures. L'étude des impacts du réchauffement climatique dans le secteur agricole peut donc se faire en couplant la modélisation hydrologique, informant sur la ressource en eau disponible, à la modélisation agronomique, informant sur la demande en eau agricole (Milano, 2012 ; Collet, 2013 ; McNider et al., 2014 ; Sauquet et al., 2014).

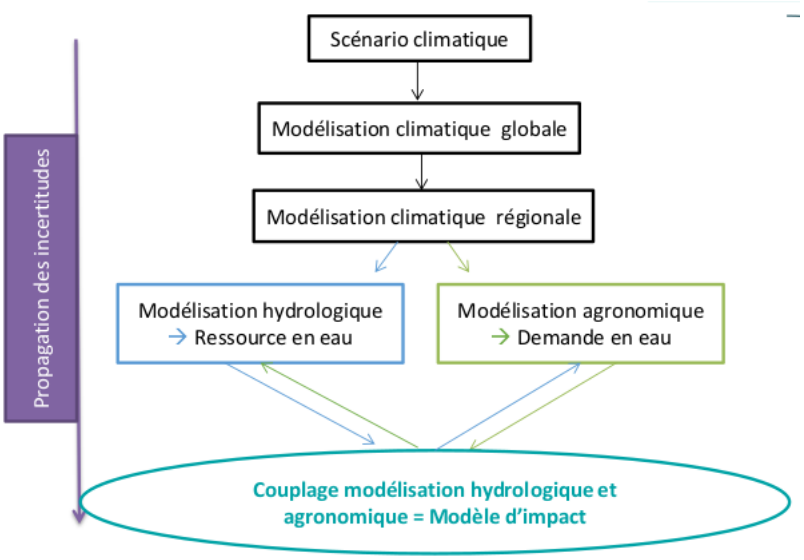


FIGURE 1 – Chaîne de modélisation d'impact du changement climatique sur la ressource en eau et l'agriculture. *Modifié de : Boé, 2007*

L'utilisation de modèles successifs entraîne une "cascade d'incertitudes" (Mitchell and Hulme, 1999 ; Boé, 2007), interrogeant l'interprétation à faire des sorties de cette chaîne de modélisation.

2.2 Prise en compte des incertitudes par l'approche ensembliste

Traditionnellement, les études d'impact s'appuyaient sur une approche déterministe, c'est-à-dire fondée sur le développement d'un modèle le plus performant possible et l'utilisation d'un scénario le plus probable pour répondre à un objectif (Kay et al., 2009). Néanmoins, une approche déterministe ne permet pas de quantifier les incertitudes liées à la modélisation, qui sont de trois types : 1) incertitude liée aux données d'entrée et à leur résolution spatio-temporelle ; 2) incertitude liée à la structure du modèle, c'est-à-dire aux équations sur lesquelles il s'appuie et aux processus représentés ; 3) incertitude liée aux valeurs attribuées aux paramètres du modèle (EEA, 2017). Dans les travaux reposant sur des projections futures, il est donc devenu incontournable de travailler selon une approche ensembliste, c'est-à-dire s'appuyant sur un ensemble de scénarios et un ensemble de modèles pour représenter l'ensemble des futurs possibles (Chauveau et al., 2013 ; Sauquet et al., 2014) et ainsi quantifier de façon plus précise et complète les impacts du changement climatique. Il est donc recommandé de réaliser des projections selon une approche multi-modèle et multi-scénario (IPCC, 2007, 2014 ; Hawkins and Sutton, 2009).

2.3 Modélisation de la ressource en eau

Les modèles hydrologiques permettent de simuler à un pas de temps donné les flux d'eau d'un bassin versant (Fig. 2), et donc la ressource en eau disponible à chaque pas de temps.

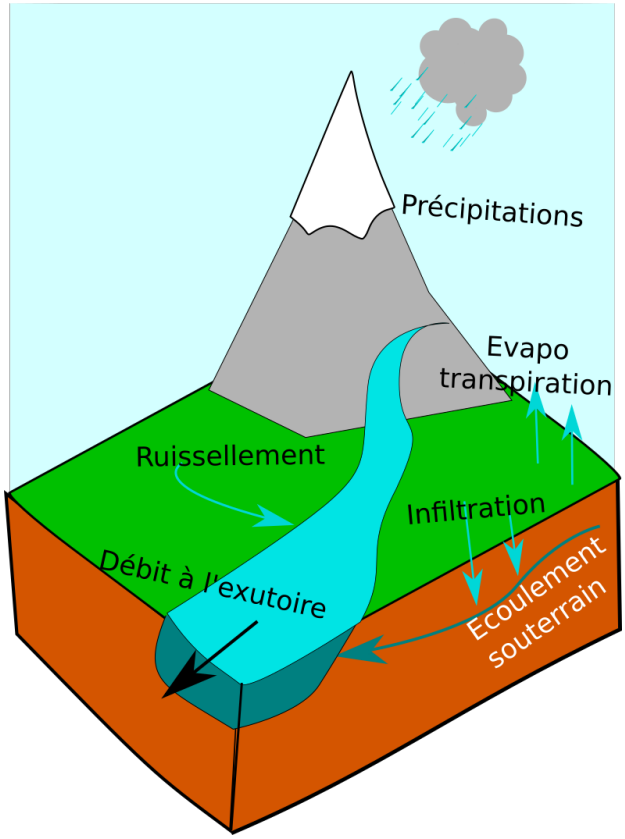


FIGURE 2 – Flux hydriques considérés pour la modélisation hydrologique. *Source : personnelle*

Il existe trois principales familles de modèles hydrologiques (Hrachowitz and Clark, 2017) :

- les modèles à base physique : ces derniers représentent le bassin versant selon des équations physiques décrivant des processus discrétisés, et informent donc sur l'ensemble des variables qui interviennent dans ces équations (e.g. SIM, Habets et al., 2008) ;
- les modèles à base conceptuelle, ou à réservoirs : ceux-ci représentent un bassin comme une succession de réservoirs conceptuels liés entre eux par des fonctions de transfert. Les dimensions des réservoirs et les coefficients de transfert font l'objet de calage. Les modèles hydrologiques pluie-débit du génie rural (GR) modélisent par exemple le débit à l'exutoire des bassins versants de façon très performante pour des bassins contrastés sur en France et dans le monde (e.g. GR5J, Le Moine et al., 2008, voir Fig. 9a) ;
- les modèles empiriques : ils relient selon des lois définies empiriquement les entrées et les sorties d'un bassin versant.

Les modèles hydrologiques peuvent aussi se distinguer par leur degré de discrétisation spatiale (Hrachowitz and Clark, 2017) :

- les modèles globaux « moyennent » le fonctionnement hydrologique du bassin versant considéré, sans représenter la variabilité des paramètres et la répartition des débits internes au sein du bassin versant (e.g. GR5J, Le Moine et al., 2008, Fig. 9a) ;
- les modèles distribués découpent les bassins versants en mailles fines, exerçant des bilans en eau entre chaque maille et prenant ainsi en compte la variabilité des paramètres du bassin versant et les données météorologiques de façon très fine spatialement (e.g. SIM, Habets et al., 2008). Ces modèles, généralement à base physique, demandent un grand nombre de paramètres, caractéristiques des propriétés physiques du bassin pour chaque unité spatiale considérée, ce qui se répercute sur le temps de paramétrisation du modèle et le temps de calcul ;
- les modèles semi-distribués proposent une approche intermédiaire, en découpant le bassin versant selon des sous-bassins versants à une résolution plus grossière qu'un maillage distribué, et permettant ainsi un niveau de détail qui semble pertinent pour le modélisateur (e.g. GRSD, Lobligeois et al., 2014).

De plus, les modèles hydrologiques divergent par le niveau de discrétisation temporelle (Perrin et al., 2007), allant du pas de temps horaire, principalement utilisé pour la prévision de crues, au pas de temps annuel, performant pour la quantification de la ressource en eau à grande échelle, en passant par les pas de temps journalier et mensuel.

La simulation des étiages dans les modèles GR a été améliorée progressivement, en complétant la représentation de la dynamique des échanges entre l'eau de surface et les compartiments souterrains par un nouveau paramètre (e.g. GR5J, Le Moine et al., 2008, voir Fig. 9a, par rapport à GR4J, Perrin et al., 2003). Un modèle représentant les étiages de façon plus performante est pertinent pour étudier les impacts du changement climatique sur les faibles débits.

2.4 Modélisation de la demande en eau agricole

L'agriculture consomme de l'eau par évapotranspiration, c'est-à-dire la vaporisation de la réserve en eau du sol par le cumul entre évaporation du sol et transpiration des cultures. Ce phénomène d'évapotranspiration est conditionné (Allen et al., 1998) par :

- des grandeurs physiques climatiques, telles que la température, l'ensoleillement, le vent, permettant de calculer une évapotranspiration de référence, $\mathbf{ET_0}$, correspondant à l'évapotranspiration d'un couvert végétal de référence sélectionné au regard de la zone d'étude. Cette ET_0 peut notamment être estimée par la formule de l'évapotranspiration potentielle Oudin (Oudin et al., 2005), ou la formule de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), représentant l'évapotranspiration sans contrainte hydrique d'un gazon uniforme ;
- le stade végétatif des cultures. A chaque campagne de culture, la transpiration des plantes augmente progressivement avec leur développement. L'évapotranspiration calculée en prenant en compte le stade de développement des cultures est appelée $\mathbf{ET_C}$ (Fig. 3) ;
- l'humidité du sol, dépendant des apports en eau tels que la pluie et l'irrigation. En effet, si la réserve en eau du sol n'est pas suffisante, l'évapotranspiration est contrainte par le stress hydrique. L'évapotranspiration correspondante est appelée $\mathbf{ET_{C_adj}}$ (Fig. 3).

Cette évapotranspiration est ensuite utilisée pour établir le bilan en eau au niveau des sols cultivés, et en déduire la demande en eau d'irrigation (Fig. 4).

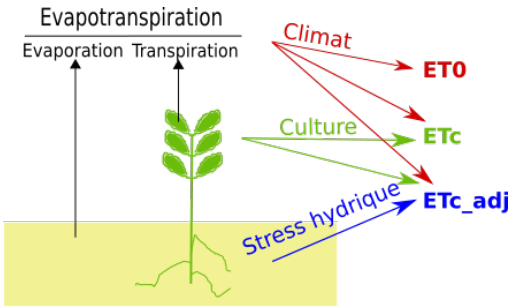


FIGURE 3 – Les différentes évapotranspirations, selon les facteurs pris en compte. *Modifié de : Allen et al., 1998*

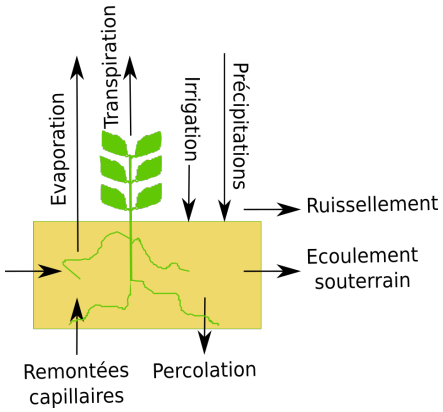


FIGURE 4 – Bilan en eau au niveau des sols cultivés. *Modifié de : Allen et al., 1998*

Pour permettre aux cultures de se développer de façon optimale, il faut leur permettre d'atteindre dans la mesure du possible l'ET_C, ce qui est possible avec un apport en eau suffisant. Des modèles agronomiques permettent d'estimer la demande évaporative des cultures, et de calculer en fonction l'eau d'irrigation nécessaire pour répondre à cette demande. Ces modèles sont nombreux, chacun possédant des hypothèses de modélisation et des paramètres différents (Brisson and Levrault, 2010). Ils associent généralement des approches mécanistes, simulant des processus biologiques, physiques et chimiques intervenant dans le sol et les plantes en réaction aux variables d'entrée, et des approches empiriques, représentant certains processus de façon simplifiée sur la base d'observations. On peut notamment distinguer :

- **Les modèles sol-plante-atmosphère :** ils représentent les transferts de minéraux, d'énergie et d'eau, et permettent de paramétrer les équations mises en jeu dans ces transferts selon les espèces végétales présentes. Au sein de ces modèles, certains :

  – reposent en premier lieu sur la simulation de la **prise de biomasse** en fonction du rayonnement. C'est le cas des modèles STICS (Brisson et al., 2003), ou CERES (Jones and Kiniry, 1986) ;

  – visent en priorité à simuler les **bilans en eau** des cultures (Fig. 4), et peuvent estimer les rendements à partir de la satisfaction de la demande évaporative des cultures. Les modèles la

FAO (Allen et al., 1998) utilisent une approche par coefficient cultural, qui attribue à chaque stade de développement d'une culture donnée un coefficient cultural empirique ($\mathbf{K_C}$) reliant l'ET_0 à l'ET_C selon l'Equation 1 :

$$ET_C = K_C \times ET_0 \quad (1)$$

Parmi les modèles utilisant l'approche par coefficient cultural, certains nécessitent les K_C et la durée de chaque stade de développement correspondant à une valeur de K_C comme données d'entrée (e.g. CropWat, section 4.2). D'autres modèles simulent eux-mêmes, en fonction des conditions climatiques, le développement des plantes (e.g. Maelia, Thérond et al., 2014), et donc la durée des différents stades de culture et ajustent la valeur de K_C à chaque instant en fonction ;

- **Les modèles simulant le comportement des agriculteurs :** Ils simulent les opérations techniques (semis, irrigation, fertilisation, récolte, etc.) selon un panel de règles, par opposition à des itinéraires techniques préfixés. Cette stratégie de modélisation permet de mieux comprendre les stratégies adaptatives face aux variables climatiques, stratégies qui peuvent avoir de fortes conséquences sur la répartition temporelle de la demande en eau. En effet, les conditions climatiques ont des conséquences sur la date de semis et de récolte des cultures (Leenhardt et al., 2012). Cette catégorie de modèle peut être associée à des modèles sol-plante-atmosphère (e.g. MAELIA, Thérond et al., 2014), notamment si l'état de la réserve en eau du sol est pris en compte par l'agriculteur pour déclencher l'irrigation, ou encore pour étudier l'évolution de paramètres agronomiques d'intérêt ;
- **Les modèles purement empiriques :** Ces modèles, via des traitements statistiques sur des données observées, permettent de simuler les rendements en fonction du climat (Ortiz-Bobea et al. 2019). Néanmoins, mettre au point de tels modèles pour simuler plus spécifiquement la demande en eau d'irrigation n'est pas envisageable à ce jour, car les données de prélèvements sont lacunaires et trop peu fiables pour les utiliser comme données de calage.

2.5 Couplage des modélisations de la ressource et de la demande en eau

Sur les bassins versants agricoles, le couplage entre la modélisation de la ressource en eau disponible et la modélisation de la demande en eau d'irrigation permet notamment d'évaluer la satisfaction de la demande en eau des cultures et les impacts des prélèvements sur la ressource en eau (Milano, 2012 ; Collet, 2013 ; McNider et al., 2014). Plusieurs modalités de couplage permettent d'évaluer les interactions entre hydrologie et demande agricole. Il est possible :

- de simuler l'effet des prélèvements agricoles sur les débits, en effectuant sur chaque sous-bassin versant considéré un bilan entre prélèvements et rejets (Collet, 2013 ; Thérond et al., 2014) ;
- réciproquement, les impacts sur les cultures de la limitation physique des prélèvements par les volumes disponibles. On peut alors calculer un indice de satisfaction, fonction de la fréquence à laquelle l'eau disponible est inférieure à la demande (voir e.g. Milano, 2012 ; Chauveau et al., 2013 ; Collet et al., 2015), ou fonction du rapport entre demande en eau et débits disponibles (McNider et al., 2014), ou encore estimer l'effet sur les rendements des cultures de la contrainte de la disponibilité en eau sur les prélèvements (e.g. AquaCrop, Steduto et al., 2009 ; Maelia, Thérond et al., 2014).

Les modèles agronomiques fonctionnent généralement à un petit pas de temps (horaire, journalier), et selon une résolution spatiale fine, à la parcelle (Brisson and Levrault, 2010, Section 2.4). Pour cette raison, il apparaît pertinent d'utiliser des modèles hydrologiques fonctionnant au pas de temps journalier et distribués à semi-distribués. Néanmoins, les modèles distribués sont plus difficiles à paramétrer et sont lourds en temps de calcul (Section 2.3). Ils sont donc difficilement mobilisables pour réaliser des études d'impacts en approche ensembliste, approche qui nécessite plusieurs modèles et

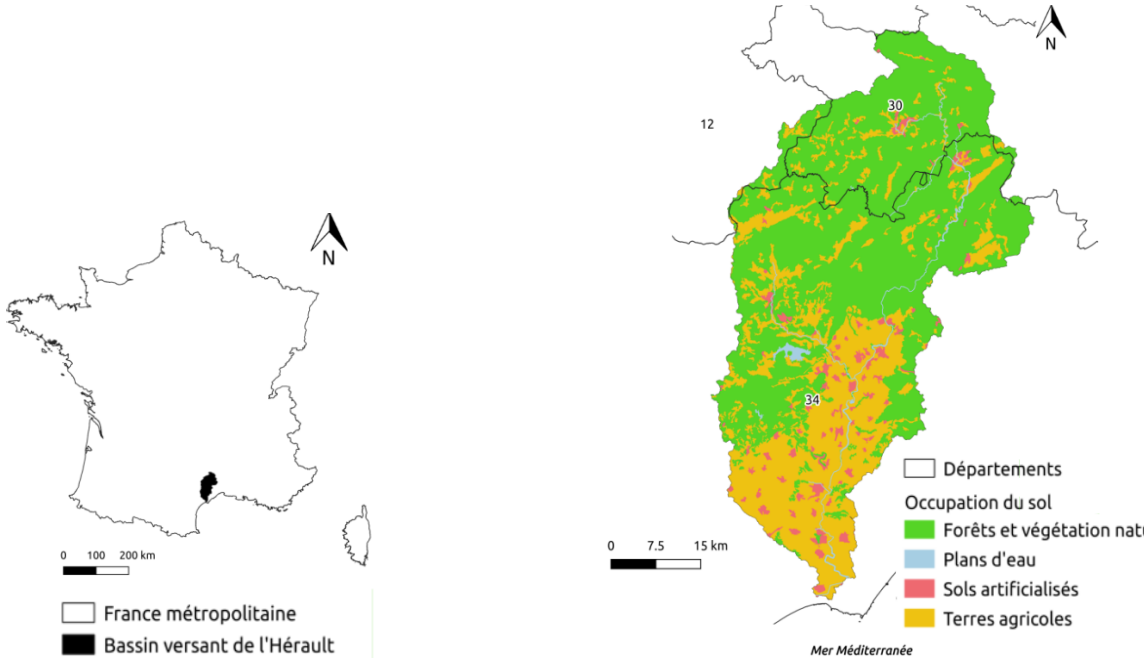
plusieurs scénarios (voir Section 2.2). Coupler la modélisation agronomique et la modélisation hydrologique dans un objectif de parcimonie constitue par conséquent un objectif de recherche pertinent. Ainsi, si des études diverses, à différentes échelles, ont déjà permis d'évaluer les impacts du changement climatique sur des bassins versants agricoles (e.g. R2D2, Sauquet et al., 2014 ; Milano, 2012 ; Collet, 2013 ; McNider et al., 2014), elles ont constitué des démarches lourdes et très spécifiques à un territoire donné. Il semble de plus intéressant de ne pas limiter la modélisation à un indicateur de satisfaction de la demande en eau d'irrigation, mais aussi d'évaluer la vulnérabilité de l'agriculture en termes de stress hydrique, et ainsi traduire les éventuelles conséquences de l'incapacité à satisfaire la demande en eau d'irrigation ou pluviale - pour les cultures non irriguées - en un indicateur agronomique. Il convient de plus de représenter les effets des prélèvements sur les débits.

Mon mémoire vise ainsi à répondre à la question : *Comment coupler la modélisation hydrologique et la modélisation agronomique pour évaluer les impacts du changement climatique sur la vulnérabilité du secteur agricole en prenant en compte les incertitudes, et ce de façon robuste et parcimonieuse ?*

3 Matériel : zone d'étude et données disponibles

3.1 Présentation de la zone d'étude

La zone étudiée est le bassin du fleuve Hérault, dont l'exutoire se situe à Agde, au niveau de la mer Méditerranée dans le Sud de la France. Ce bassin de 2600 km^2 environ se situe à cheval sur trois départements : l'Aveyron (12) au nord-ouest, le Gard (30) au nord, et l'Hérault (34) pour la majeure partie (Fig. 5). Le bassin versant de l'Hérault correspond à un territoire très rural, avec une surface majoritairement composée de forêts et de végétations naturelles méditerranéennes, souvent pâturées, au Nord du bassin. Une grande partie de la surface est également occupée par des cultures. Les zones d'habitation, parsemées, se situent en majorité dans la partie Sud du bassin (Fig. 5).



(a) Localisation du bassin de l'Hérault (b) Occupation du sol du bassin de l'Hérault. *Source : CLC 2012*

FIGURE 5 – Localisation et organisation géographique du bassin versant de l'Hérault

3.2 Données hydro-climatiques

Les données SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige, Vidal et al., 2010) permettent de connaître les chroniques climatiques journalières sur des mailles de 8 km d'août 1958 à aujourd'hui. La Figure A.1 (Annexe A) permet ainsi de constater que le bassin présente un gradient croissant Nord-Sud de température (température moyenne comprise entre 7,8 et 9,5°C au nord, entre 14 et 15,7°C au sud sur la période 2009-2019) et décroissant de pluviométrie (pluviométrie moyenne journalière comprise entre 4 et 4,7 mm au nord du bassin, et entre 1,3 et 2 mm au sud sur la période 2009-2019). Les contours du bassin de l'Hérault et des sous-bassins qui le constituent sont disponibles dans la base de données de l'unité de recherche HYCAR (Delaigue et al., 2020). La banque HYDRO (Leleu et al., 2014) permet d'accéder aux débits journaliers à l'exutoire des principaux sous-bassins versants sur notre zone d'étude, au niveau des stations présentées dans la Figure 6. Ce sont ces débits observés qui permettront de caler le modèle hydrologique à partir des données climatiques SAFRAN.

Le fleuve Hérault est principalement alimenté par l'Arre et la Vis en amont, puis par le barrage du Salagou, avant de se déverser dans la mer Méditerranée (Fig. 6). Il présente un dénivelé d'environ 1550 m du Nord vers le Sud, ce qui explique notamment en partie le gradient climatique observé en Figure A.1 (Annexe A).

Le bassin présente ainsi une hydrologie très variable au cours de l'année, avec un débit journalier moyen variant de 2,8 m^3/s en août contre 60,8 m^3/s en novembre sur l'Hérault à Gignac. Cette variabilité s'explique par les très faibles précipitations et les fortes températures en période estivale, et les pluies importantes en automne caractéristiques des bassins versants méditerranéens (Fig. 7).

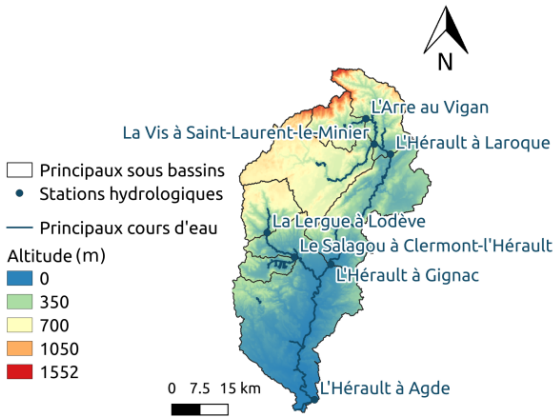


FIGURE 6 – Hydrologie du bassin versant de l'Hérault. *Sources : MNT, BD Carthage, Banque HYDRO*

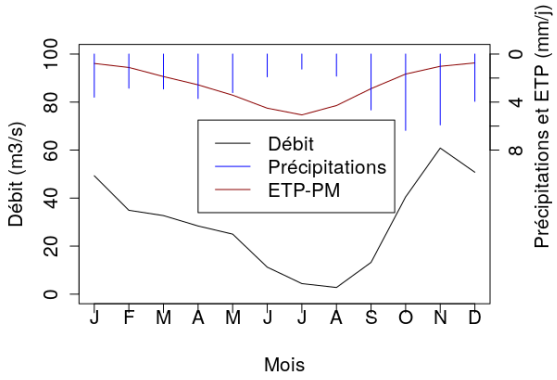


FIGURE 7 – Régime moyen du débit, des précipitations, et de l'évapotranspiration Penman-Monteith journaliers sur le bassin versant de l'Hérault à Gignac entre le 1er août 1990 et le 31 juillet 2019. *Sources : Banque HYDRO, SAFRAN*

Seules les simulations des bassins de l'Arre, de la Vis, de l'Hérault à Laroque et de l'Hérault à Gignac seront réalisées dans le cadre de ce travail, ce qui correspond à une aire peu artificialisée. Les données de débit journalier sont disponibles aux stations correspondantes depuis au moins 1990, et sont de bonne qualité (peu de lacunes, fort indice de confiance).

3.3 Données agronomiques

Le registre parcellaire graphique (RPG) associe à chaque parcelle agricole la culture déclarée au titre des aides PAC de façon annuelle depuis 2010. Le RPG 2018 révèle ainsi que près de 70 % sont des surfaces d'élevage extensif, qui par définition occupe beaucoup d'espace, ou d'intérêt agro-écologique. En mettant de côté ces surfaces, la viticulture domine largement l'activité agricole sur le bassin.

Par ailleurs, le recensement général agricole (RGA), qui a lieu tous les 10 ans, permet de décrire à ces occasions la totalité des surfaces agricoles par culture, selon une agrégation communale, ainsi que la proportion de surfaces irriguées. Une base de données conservée au sein d'INRAE présente également les surfaces occupées par différentes catégories de cultures par sous-bassin versant du bassin de l'Hérault, recensées à l'occasion du RGA 2010 (Collet, 2013). Les données du RGA 2010 par sous-bassin versant recensent de façon plus complète la surface agricole et informent notamment sur la **proportion irriguée de ces surfaces par type de culture**, contrairement aux données de RPG dont nous disposons. Néanmoins, les catégories de culture sont moins précises que les données du RPG. Un travail de croisement spatial a donc été effectué entre RGA 2010 et RPG 2010 et 2018, afin de préciser, par catégorie de culture du RGA et par sous-bassin versant, les cultures correspondantes. Il a finalement été retenu le paysage agricole par sous-bassin présenté en Figure 8.

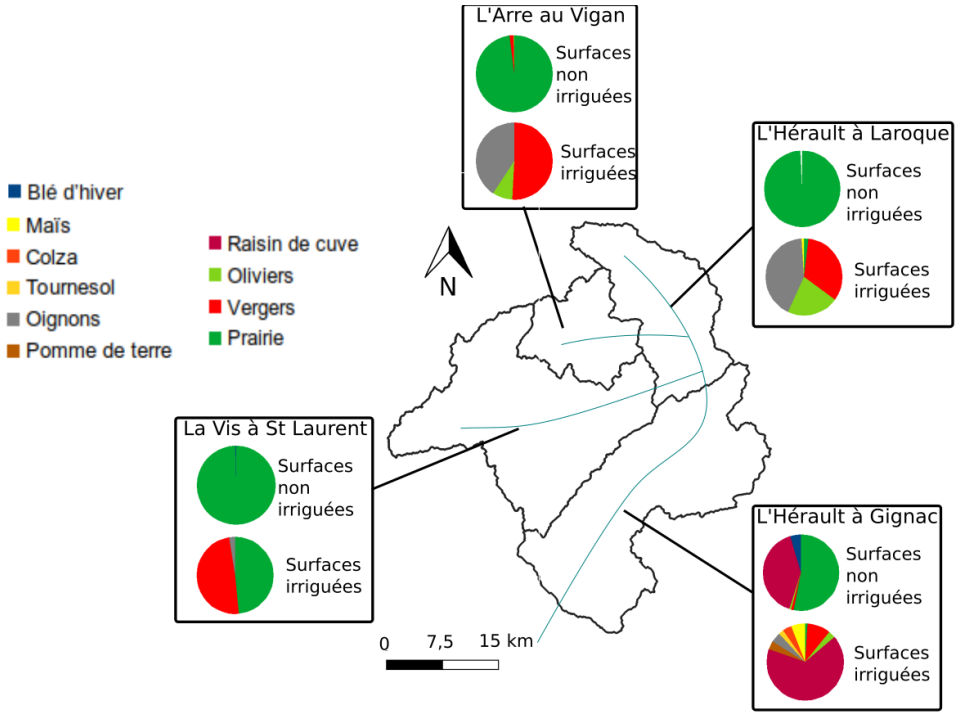


FIGURE 8 – Paysage agricole par sous-bassin versant étudié. *Sources : RGA 2010, RPG 2010 et 2018*

De nombreuses données de K_C, de longueurs de stade empiriques, de facteur de puisement ou encore de profondeur de racines, prises en compte dans la modélisation agronomique, sont déjà recensées dans la littérature, et peuvent être ajustées selon les données climatiques locales pour mieux prendre en compte l'évaporation du sol (Allen et al. 1998). Les données relatives aux cultures par sous-bassin versant ont ainsi été construites grâce aux données tabulées de la FAO, et des données mesurées localement (BRL, 2018).

Les modèles agronomiques demandent également des informations sur les sols. Pour ces dernières, nous reprenons les hypothèses formulées par Collet (2013) d'un sol homogène sur le bassin qui présente les propriétés présentées dans le Tableau A.3 (Annexe A).

Par ailleurs, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse met à notre disposition les données de prélèvement déclarés annuellement de 1987 à 2018, qui permettront de vérifier la cohérence des simulations de la modélisation agronomique avec ces données. La qualité de notre modélisation agronomique pourra aussi être mise au regard de préconisations d'irrigation calculées par BRL à partir des données de la station météorologique de Montpellier, au sud-est du bassin étudié (BRL, 2018).

4 Méthodologie

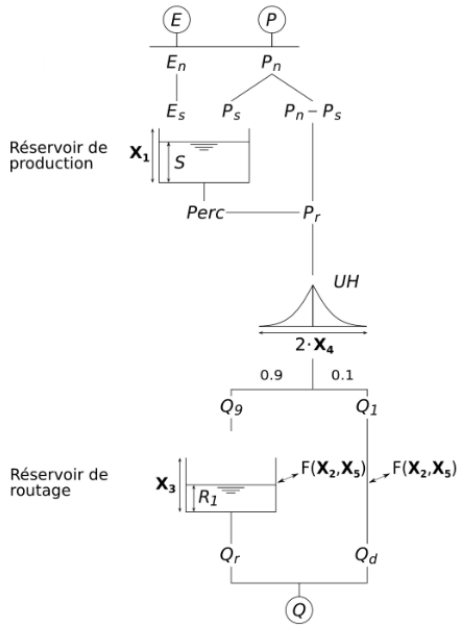
4.1 Méthodologie de modélisation hydrologique

Le modèle hydrologique utilisé est le modèle global conceptuel GR5J (Le Moine et al., 2008, Fig. 9a), qui permet de simuler le débit à un pas de temps journalier à l'aide de cinq paramètres, et qui a été conçu pour obtenir une bonne performance sur les débits d'étiage. Le modèle GR5J est composé d'un réservoir de production, caractérisé par la capacité de ce réservoir X_1 (en mm) qui permet de faire le bilan journalier entre précipitations et évapotranspiration. L'eau quittant ce réservoir est transférée selon un hydrogramme unitaire de temps de base X_4 (en jours) vers la partie "routage" du modèle. Le réservoir de routage est caractérisé par sa capacité X_3 (en mm). La partie "routage" du modèle est soumis à un coefficient d'échange souterrain X_2 (en mm), nuancé par le paramètre X_5 adimensionnel indiquant le sens de l'échange en fonction du niveau du réservoir de routage.

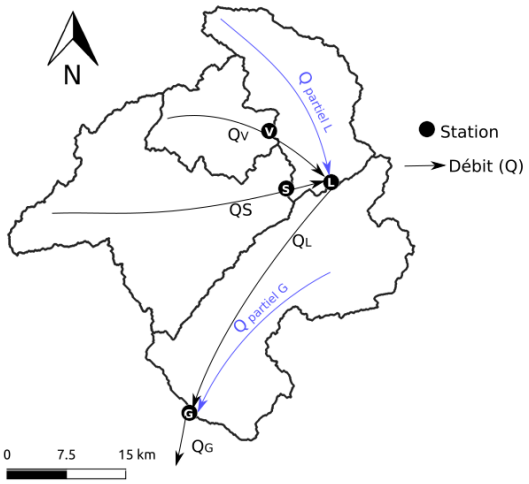
Le calage de GR5J est effectué sur chaque sous-bassin selon une approche semi-distribuée (Fig. 9b). Le débit partiel observé $Q^{\text{partiel}}_{\text{obs_aval}}$ de chaque sous-bassin est estimé en retirant les débits amont observés $Q_{\text{obs_amont}}$ au débit aval observé $Q_{\text{obs_aval}}$, selon l'Équation 2. Le calage du modèle sur chacun des sous-bassins est effectué sur ces débits partiels observés. Cette approche a été choisie pour des raisons de mise en œuvre plus facile : un modèle hydrologique semi-distribué calé sur les débits totaux sera utilisé par la suite (travaux de thèse), mais cela n'a pas été possible ici en raison de la non-faisabilité actuelle d'un couplage complet dans le package R airGR utilisé pour cette étude (Coron et al., 2017, 2020). Si le calage est effectué selon les débits partiels observés, nous évaluons notre modèle selon les débits simulés réagrégés $Q^{\text{glob}}_{\text{sim}}$ (Éq. 3).

$$Q^{partiel}_{obs_aval} = Q_{obs_aval} - \sum Q_{obs_amont} \tag{2}$$

$$Q^{glob}_{sim} = Q^{partiel}_{sim} + Q^{amont}_{sim} \tag{3}$$



(a) Fonctionnement du modèle GR5J. *Source : Le Moine, 2008*



(b) Semi-distribution des débits sur la zone d'étude. V : Arre au Vigan ; S : Vis à St-Laurent ; L : Hérault à Laroque ; G : Hérault à Gignac

FIGURE 9 – Modélisation hydrologique de la zone d'étude

Les débits partiels des bassins peuvent ainsi être simulés à l'aide de GR5J en fonction des données d'entrée climatiques SAFRAN (Précipitations totales, ETP Penman-Monteith) moyennées sur la **portion de bassin** correspondante et en calant selon le débit partiel observé.

Pour le calage du modèle sur chaque sous-bassin, une fonction objectif F_{obj} est sélectionnée pour sa capacité à concilier le calage sur les forts et très faibles débits. Il s'agit d'une fonction composite du critère de Kling Gupta (KGE, Gupta et al., 2009) sur le débit Q et l'inverse du débit (Éq. 4).

$$F_{obj}(Q) = \frac{KGE(Q) + KGE(\frac{1}{Q})}{2} \tag{4}$$

Plusieurs jeux de paramètres vont être calés, selon différentes périodes, pour évaluer la sensibilité du modèle hydrologique à la paramétrisation, et évaluer la robustesse du modèle :

- calage sur la période totale du 1er août 1990 au 31 juillet 2019 ;
- calage selon un selon un Split Sample Test (Klemeš, 1986) :
  – calage sur la période P_1 : 01/08/1990 - 31/07/2005, contrôle sur la période P_2 : 01/08/2005 - 31/07/2019 ;
  – calage sur P_2, contrôle sur P_1.

Effectuer un Split Sample Test permet en effet de prendre en compte l'incertitude liée à l'hétérogénéité entre la période de calage et la période de simulation, soit à la robustesse du modèle en condition de changement climatique (Thirel et al., 2015). Trois jeux de paramètres sont donc finalement obtenus sur chaque sous-bassin versant.

4.2 Méthodologie de modélisation agronomique

4.2.1 Les formalismes de CropWat

Le modèle de la FAO à un coefficient (Allen et al, 1998), communément appelé sous le nom du logiciel CropWat, est sélectionné pour sa parcimonie. CropWat s'appuie sur la méthode des K_C (Section 2.4), permettant d'effectuer le bilan en eau sur une parcelle agricole à chaque pas de temps.

Le modèle prend comme données d'entrée les caractéristiques des cultures, qui sont :

- les K_C, permettant de calculer l'ET_C selon l'Équation 1, associés à trois stades de développement de la culture (initial, moyenne saison, et final) ;
- la durée des stades de développement de la plante correspondant aux valeurs de K_C prises par la plante en fonction de l'avancement de son développement ;
- le facteur de puisement (p), qui traduit la capacité d'une culture à puiser l'eau dans le sol ;
- la profondeur racinaire Z_r.

Les valeurs de K_C entre le stade initial, la moyenne saison et le stade final sont calculées par interpolation linéaire entre les valeurs de K_C renseignées. Les courbes simulées sur la base des données de BRL (2018) sont ainsi présentées en Figure 10.

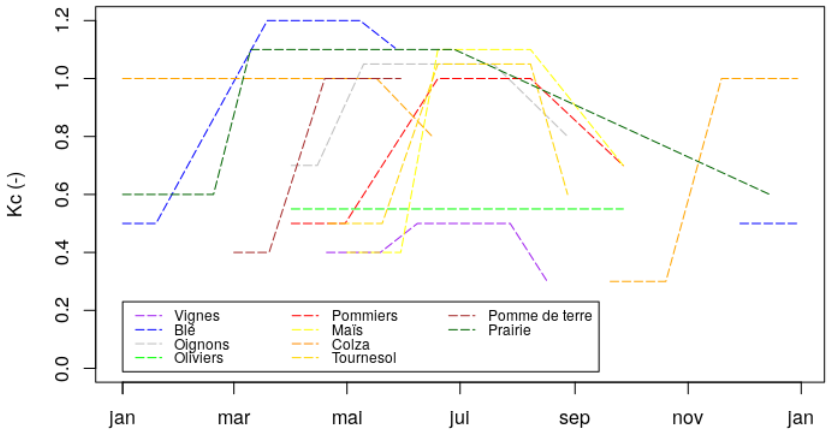


FIGURE 10 – Courbes de K_C pour les différentes cultures simulées. *Sources : BRL, 2018, FAO, 1998 (pour l'oignon)*

Si la profondeur des racines et le facteur de puisement varient également au cours des stades de développement, ces valeurs ont été maintenues constantes au cours du cycle dans ce travail pour faciliter la modélisation dans un premier temps. Les valeurs retenues par culture sont présentées dans le Tableau A.1 (Annexe A).

La **réserve utile** (RU) désigne la réserve d'eau totale du sol accessible pour la plante (Fig. 11), soit l'eau contenue dans le sol entre la capacité au champ et le point de flétrissement. Elle est calculée (en mm) selon la profondeur racinaire (en m), l'humidité à capacité au champ ω_{CC} et au point de flétrissement ω_{PF} (en kg/kg), la masse volumique apparente du sol ρ_a et la masse volumique de l'eau ρ_{eau} (en g/cm^3), et la pierrosité T_p (en m^3/m^3) selon l'Équation 5. Si la réserve utile s'épuise, la plante se flétrit. Le facteur de puisement (p) permet de calculer la **réserve facilement utilisable** (RFU) par la plante, selon l'Equation 6 (Fig. 11).

$$RU = Z_r \times (\omega_{CC} - \omega_{PF}) \times \frac{\rho_a}{\rho_{eau}} \times (1 - T_p) \times 1000 \quad (5)$$

$$RFU = p \times RU \quad (6)$$

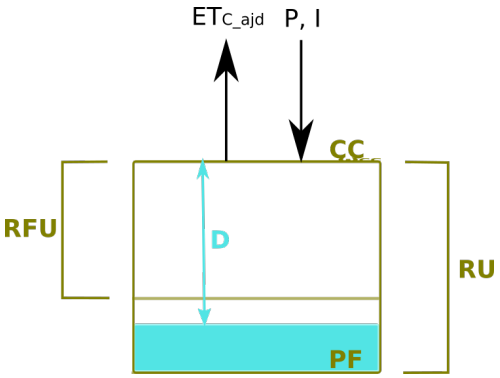


FIGURE 11 – Bilan en eau journalier du sol par CropWat. CC : humidité du sol à la capacité au champ, PF : humidité du sol au point de flétrissement, RU : réserve utile, RFU : réserve facilement utilisable, P : précipitations, ET_{C_adj} : évapotranspiration ajustée selon K_S, I : irrigation, D : déficit en eau

Quand la RFU est épuisée, la plante commence à subir un stress hydrique, limitant son évapotranspiration, selon le calcul de l'ET_{C_adj} par l'Equation 7. Le **coefficient de stress hydrique** (K_S) est calculé en fonction du déficit en eau du sol (D, Fig. 11, Annexe B : Fig. B.1), qui désigne l'écart entre la hauteur d'eau du sol à capacité au champ et la hauteur d'eau contenue dans le sol (en mm) (Équation 8).

Chaque jour i, le bilan hydrique du sol permet de mettre à jour la valeur de D selon l'Équation 9. Il est estimé que si l'apport en eau de pluie ramène le déficit hydrique à une valeur inférieure à 0, ce qui revient à dépasser l'humidité de la capacité au champ, l'eau est évacuée par percolation et ruissellement. Quand D atteint la RU, cela revient à épuiser intégralement la réserve en eau du sol accessible pour la plante.

$$ET_{C_adj} = K_S \times ET_C \quad (7)$$

$$K_S = \begin{cases} \frac{RU-D}{RU-RFU} & si\ D > RFU \\ 1 & sinon \end{cases} \quad (8)$$

$$D_i = \begin{cases} 0 & si\ D_{i-1} + ET_{C_adj_i} - P_i - I_i < 0 \\ RU & si\ D_{i-1} + ET_{C_adj_i} - P_i - I_i > RU \\ D_{i-1} + ET_{C_adj_i} - P_i - I_i & sinon \end{cases} \quad (9)$$

L'eau apportée par irrigation peut suivre différentes hypothèses de simulation. L'irrigation peut par exemple être déclenchée dès qu'un seuil de déficit D est atteint, ou selon des dates préfixées. L'eau apportée peut alors dépendre de D, ou alors être une dose prédéfinie. Dans ce travail, nous avons simulé l'apport en eau d'irrigation par culture selon les règles définies dans le Tableau B.1 (Annexe B), s'appuyant sur le Mémento irrigation produit par BRL pour la région Occitanie (2018).

Pour faciliter le couplage avec la modélisation hydrologique, et autoriser une plus grande souplesse pour la stratégie de modélisation, le modèle agronomique a été traduit dans le cadre du stage sur le logiciel R, et a été conçu pour pouvoir simuler plusieurs années consécutives. Le détail des calculs effectués par CropWat est exposé dans la Figure B.1 (Annexe B).

4.2.2 Agrégation spatiale et temporelle à l'échelle des sous-bassins versants

Le modèle agronomique est forcé par les données climatiques moyennées à l'échelle de chaque sous-bassin. Les dates des semis/début de cycle de chaque culture ont été étalées sur 10 jours de façon uniforme, afin de forcer un étalement dans le temps des cycles de culture, et représenter de façon plus réaliste la variation temporelle des prélèvements pour l'irrigation (Annexe A : Tab. A.2).

A chaque pas de temps, la **demande en eau d'irrigation** (DEI) de chaque couple (culture ; date de début de cycle) est multiplié par la surface cultivée correspondante. L'efficacité d'irrigation est estimée à 0,8 sur le bassin (Syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault, 2015), ce qui signifie que sur 1 litre prélevé, seuls 800 ml arrivent jusqu'à la culture. Cette efficacité correspond aux fuites des réseaux et des canaux, et ne représente pas la totalité de l'eau dérivée puis renvoyée en surface pour le fonctionnement des canaux d'irrigation. Ainsi, pour chaque couple (culture ; date de début de cycle), la DEI journalière est calculée (en m^3) selon l'Equation 10, avec I la dose d'irrigation (en mm) calculée par la modélisation agronomique, et S la surface (en m^2) occupée par le couple (culture ; date de début de cycle).

$$DEI = \frac{I}{0,8} \times S \times \frac{1}{1000} \tag{10}$$

On obtient donc sur chaque sous-bassin la valeur de la demande en eau journalière DEI_{bassin} (m^3) en sommant les DEI de tous les couples (culture ; date de début de cycle) présents sur le sous-bassin.

4.2.3 Protocole de test de sensibilité de la demande en eau d'irrigation aux paramètres de la modélisation agronomique

La paramétrisation du modèle agronomique constitue une source d'incertitude, notamment sur la courbe de K_C qui diffère entre les données de la FAO (Allen et al., 1998) et le Mémento de BRL (2018) à la fois sur la périodicité des cycles, et sur les valeurs prises.

De plus, le modèle CropWat ne permet pas de prendre en compte la variabilité de la durée des cycles, liée à la variation interannuelle de la température, et en particulier à l'augmentation des températures en lien avec le changement climatique. Le rapport CLIMATOR prévoit en effet une réduction de la durée des cycles de 7 à 25 jours selon les cultures entre la période 2020-2059 et la période 1970-2000, en lien avec le changement climatique (Brisson and Levrault, 2010), ce qui pourrait avoir des conséquences sur la quantité d'eau prélevée annuellement et la périodicité des prélèvements.

Ainsi, pour un même assolement et une même proportion de cultures irriguées, nous allons étudier comment la variation des paramètres du modèle agronomique influence la DEI calculée par le modèle. La sensibilité de la modélisation agronomique à différentes variables sera étudiée à travers un protocole de test de sensibilité (Tab. 1), en faisant varier chacun de ces paramètres, tous les autres paramètres restant constants par ailleurs. L'expérience 1 correspond au paramétrage de référence, dont les valeurs sont présentées au sein de la Figure 10, et des Tableaux A.1 et A.2 (Annexe A).

L'étude de sensibilité conduira à retenir **deux paramétrisations** de la modélisation agronomique pour le couplage, afin de mieux représenter l'incertitude liée à la modélisation agronomique.

TABLEAU 1 – Protocole de test de sensibilité du modèle agronomique. Pour les expériences 8, 9 et 10, la durée totale du cycle reste constante, et les jours non effectués pendant le stade du cycle sont répartis équitablement entre les autres stades.

Expérience 1	Paramétrage de référence BRL (2018) et FAO (Allen et al.,1998) pour l'oignon
Expérience 2	Profondeur des racines **divisée** par 2
Expérience 3	Profondeur des racines **multipliée** par 2
Expérience 4	Facteur de puisement **diminué** de 0,2 (-)
Expérience 5	Facteur de puisement **augmenté** de 0,2 (-)
Expérience 6	Valeur des coefficients culturaux (initiaux, intermédiaires, et finaux) **diminuée** de 0,2 (-)
Expérience 7	Valeur des coefficients culturaux (initiaux, intermédiaires, et finaux) **augmentée** de 0,2 (-)
Expérience 8	Longueur du cycle de culture **diminuée** de 10 jours
Expérience 9	Longueur du cycle de culture **augmentée** de 10 jours
Expérience 10	Début de cycle **avancé** de 10 jours
Expérience 11	Début de cycle **retardé** de 10 jours

4.2.4 Méthodologie d'évaluation du modèle

Ce n'est qu'à partir de 2010 que les données de prélèvements de l'Agence de l'eau distinguent les prélèvements pour l'irrigation à proprement parler des prélèvements pour alimenter les canaux, simplement dérivée. Aussi, une comparaison des sorties des modèles avec les prélèvements relevés par l'Agence de l'eau est entreprise pour les données de 2010 à 2015, période durant laquelle nous pouvons supposer que l'assolement et la surface irriguée sont comparables au paysage agricole modélisé (Fig. 8). La comparaison est effectuée pour la paramétrisation de référence (Tab. 1).

Il est également possible de comparer les prélèvements simulés aux recommandations d'irrigation de BRL (2018), comme présenté dans le Tableau 2. BRL a calculé, selon une approche de bilan entre ET_C et précipitations, des recommandations de doses d'irrigation décadaires, s'appuyant sur le climat de la station météorologique de Montpellier de 1993 à 2012, situé au sud-est de la zone d'étude. On effectue donc la comparaison avec les simulations obtenues pour les années 1993 à 2012 du sous-bassin de Gignac, dont le climat est le plus comparable à celui de la station météorologique de Montpellier. La comparaison est également réalisée pour la paramétrisation de référence (Tab. 1), issue du Mémento de BRL (2018).

4.3 Méthodologie de couplage agro-hydrologique

L'objectif est d'évaluer la capacité de la ressource en eau disponible sur chaque sous-bassin versant à satisfaire la demande en eau agricole, et d'évaluer les effets de prélèvements sur les débits, afin d'évaluer la vulnérabilité de l'agriculture sur notre zone d'étude. Pour cela, à chaque pas de temps, et sur chaque sous-bassin d'amont en aval (Fig. 12) :

1. le débit journalier disponible à la station de jaugeage est calculé en sommant le débit partiel simulé de la portion de bassin aux débits amont simulés (Fig. 9b) ;
2. le modèle agronomique vérifie que le débit journalier Q à l'exutoire du sous-bassin suffit à répondre à la demande en eau agricole de ce même jour :

   (a) si la demande est satisfaite, les prélèvements peuvent être réalisés à hauteur de la demande en eau d'irrigation (DEI) du bassin.

   (b) si le débit à l'exutoire du sous-bassin ne suffit pas à satisfaire la demande :

   - les prélèvements prennent la valeur du débit journalier disponible ;
   - le volume d'eau $I_{contraint}$ (en mm) apporté à chaque couple (culture ; date de début de cycle) est alors calculé selon l'Equation 11, en fonction de DEI_{bassin} (en m^3), de Q, le débit journalier (en m^3), et de I, la dose d'irrigation (en mm) ;

$$I_{contraint} = \frac{DEI_{bassin}}{Q} \times I \tag{11}$$

- les prélèvements pour chaque couple (culture ; date de début de cycle) sont alors recalculés en fonction de $I_{contraint}$ selon l'Équation 10, et sont ensuite sommés pour calculer les prélèvements à l'échelle du sous-bassin.

3. la valeur des prélèvements sur le sous-bassin est retirée au débit à l'exutoire du sous-bassin ;
4. les pertes journalières sont additionnées au débit résiduel à l'exutoire du sous-bassin versant ;
5. le débit calculé à l'étape 4 constitue le débit amont pour l'étape 1 du sous-bassin aval.

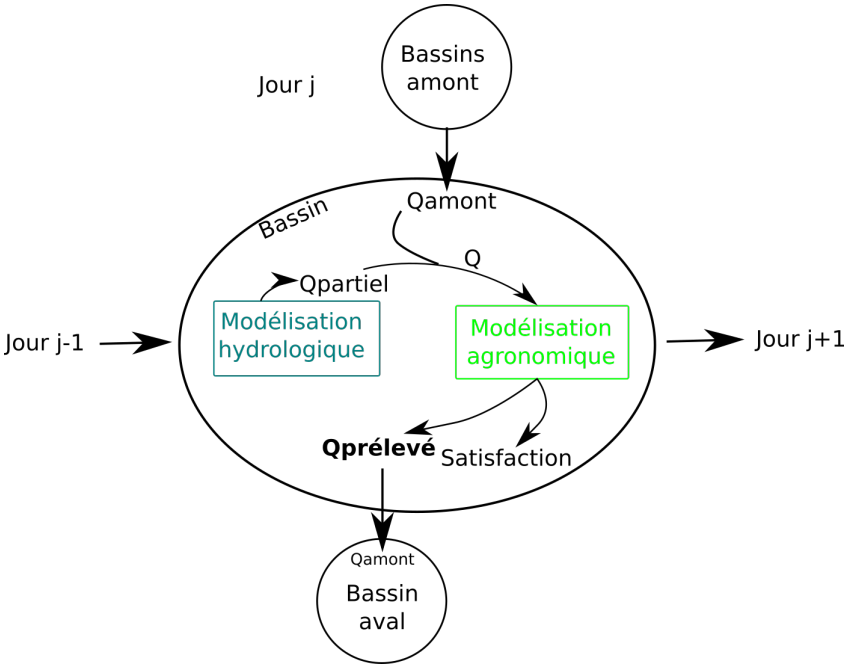


FIGURE 12 – Agrégation spatiale et temporelle du couplage agro-hydrologique. Qpartiel : le débit partiel de la portion de bassin ; Qamont : le débit issu des bassins amont ; Qprélevé : le débit prélevé pour la demande agricole

4.4 Essai du modèle sur la période historique

Dans le cadre de ce travail, la période de simulation choisie pour expérimenter le modèle couplé consistera en une rétrospective du 1er janvier 1960 au 31 décembre 2018, en utilisant comme données d'entrée climatiques la base de données SAFRAN (Vidal et al., 2010). Le modèle couplé tournera ainsi avec les trois jeux de paramètres calés pour le modèle GR5J, et deux paramétrisations agronomiques choisies au regard des résultats de l'étude de sensibilité (Section 5.2.2), permettant de prendre en compte l'incertitude sur la courbe des K_C entre les données de BRL (2018) et de la FAO (Allen et al., 1998).

Le modèle agronomique étant paramétré selon une image fixe de l'agriculture, soumettre une telle image de l'agriculture au climat passé ne permettra donc pas d'évaluer les impacts réels du climat sur l'agriculture de l'époque. Cet exercice permettra plutôt d'interroger la réactivité du modèle au climat passé et de voir ainsi les éventuels premiers effets du changement climatique sur une image donnée de l'agriculture.

Les impacts des prélèvements sur les débits seront présentés sur le mois avec les plus forts prélèvements, c'est-à-dire le mois de juillet (Section 5.2.3), pour mieux visualiser l'effet des prélèvements sur les débits. Des courbes de tendance interannuelle des différentes variables simulées seront construites par régression linéaire pour comparer qualitativement les tendances selon les simulations.

5 Résultats

5.1 Résultats de la modélisation hydrologique du bassin versant

Dans cette section, nous allons évaluer le modèle hydrologique mis en place et nous présenterons les simulations de la ressource en eau disponible sur le bassin.

5.1.1 Performance du modèle

Les valeurs obtenues de fonction objectif sont récapitulées dans le Tableau C.1 (Annexe C), et permettent de conclure sur une bonne performance, avec des valeurs de F_{obj_calage} comprises entre 0,68 et 0,89, et une bonne robustesse de la modélisation sur l'ensemble des bassins, avec des valeurs de $F_{obj_contrôle}$ comprises entre 0,67 et 0,87 et des valeurs $F_{obj_calage} \times F_{obj_contrôle}$ équivalentes quand on intervertit la période de calage et la période de contrôle lors du Split Sample Test sur l'ensemble des sous-bassins (Annexe C : Tab. C.1). Sur la Figure 13, on observe globalement peu de variations entre les simulations sur les différents sous-bassins, qui simulent de façon satisfaisante la majeure partie des débits et les régimes de ces derniers.

On observe néanmoins sur la station de l'Hérault à Gignac, à l'exutoire du bassin étudié, une plus grande difficulté à bien représenter les débits de la période P_1, à la fois pour le contrôle et le calage (Annexe C : Tab. C.1). De plus, on remarque une difficulté systématique à représenter les plus faibles débits, ce qui est particulièrement visible sur les débits du mois d'août sur la station de l'Hérault à Gignac (Fig. 13). L'incertitude est de façon générale plus forte sur le débit à Gignac.

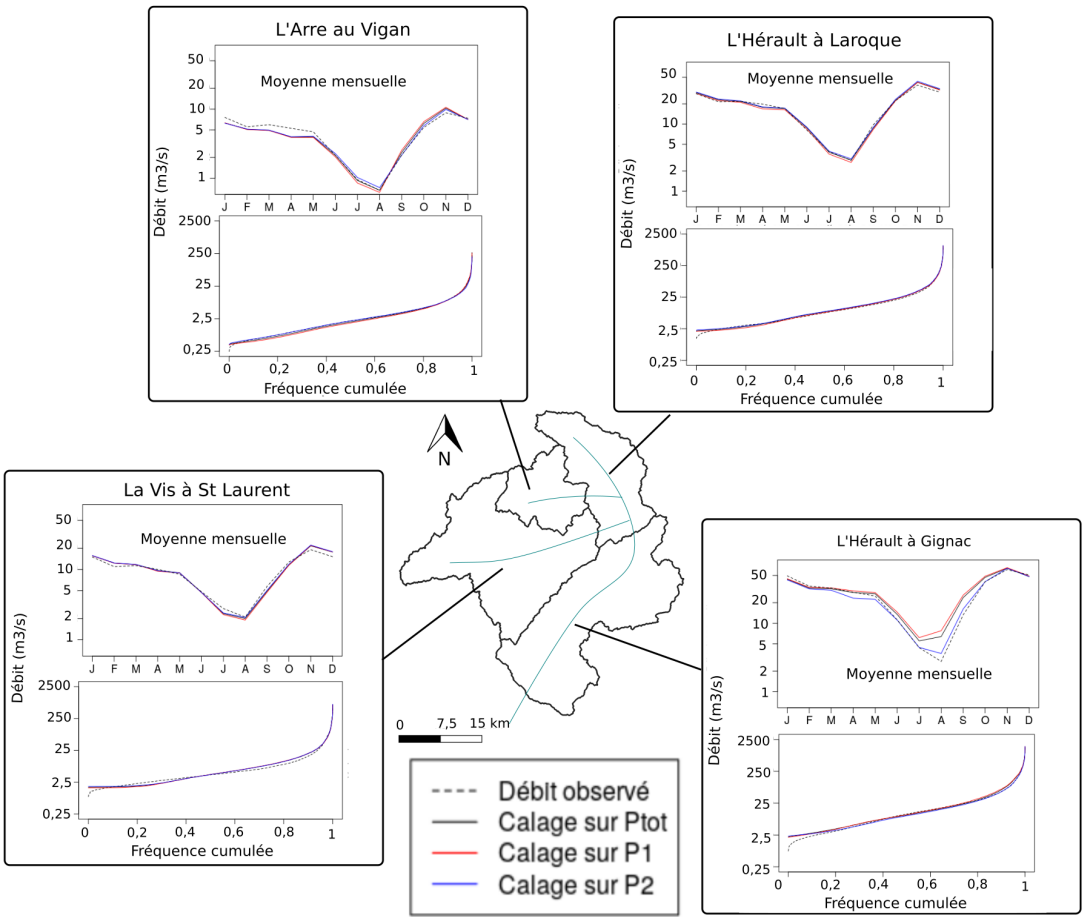


FIGURE 13 – Graphes d'évaluation de la modélisation hydrologique sur les sous-bassins étudiés sur la période 1990-2019. Une échelle logarithmique a été choisie afin de mettre en avant les bas débits.

5.1.2 Résultats de la simulation rétrospective de la ressource en eau disponible sur le bassin

Une tendance à la diminution du débit moyen est observée sur la période estivale pour tous les jeux de paramètres issus des différents calages du modèle hydrologique, avec néanmoins une forte variabilité interannuelle :

- pour les mois d'août (à Gignac : Annexe C : Fig. C.1), mois durant lequel les débits sont les plus faibles, avec une tendance à la diminution de 0,07 à 0,12 $m^3/s/an$;
- pour les mois de juillet (débit sans prélèvements à Gignac : Fig. 19a ; débit sans prélèvement sur tous les sous bassins : Annexe C : Fig. C.5), avec une tendance à la diminution de quelques centièmes de $m^3/s/an$.

5.2 Résultats de la modélisation de la demande en eau agricole

Dans cette section, nous nous intéressons au modèle de demande agricole (sans prise en compte de la ressource en eau disponible). Nous évaluons ce modèle puis nous réalisons des tests de sensibilité à ses paramètres, avant d'estimer le stress hydrique et la DEI sur le bassin d'étude.

5.2.1 Évaluation du modèle

Dans les données de prélèvements de l'Agence de l'eau, il apparaît rapidement qu'aucun prélèvement n'est relevé sur le bassin de la Vis à Saint-Laurent-le-Minier, contrairement à ce que nous avons simulé (Fig. 15). Pour le bassin de l'Hérault à Gignac, les ordres de grandeur entre nos simulations et les prélèvements ne sont pas équivalents, avec des prélèvements environ 10 fois plus importants que ceux simulés. Sur le bassin de l'Arre au Vigan, et sur celui de l'Hérault à Laroque, les ordres de grandeur des prélèvements sont bien respectés, même si la variation interannuelle des prélèvements n'est pas précisément représentée (Fig. 14). Ces différences sont discutées en Section 6.1.2.

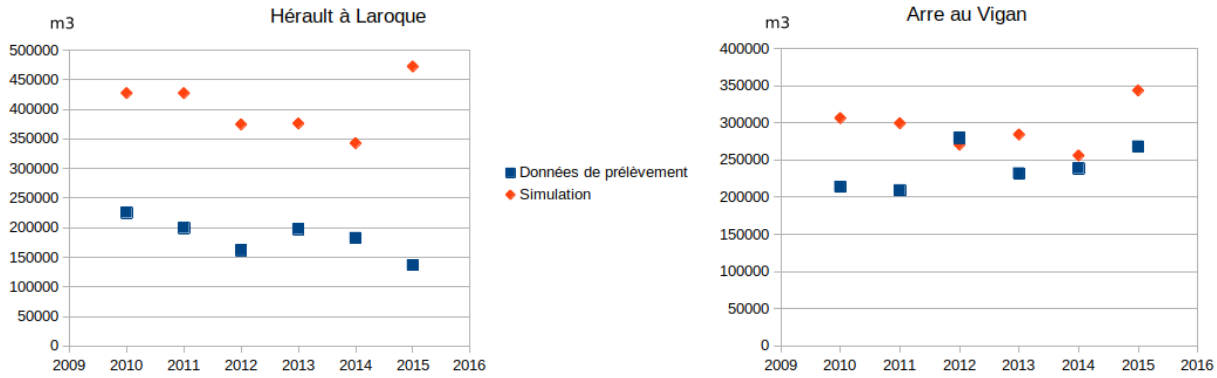


FIGURE 14 – Comparaison des prélèvements simulés (paramétrage de référence, Tab. 1) et des prélèvements déclarés au titre des redevances à l'Agence de l'eau

Concernant la comparaison de l'irrigation calculée par cultures aux recommandations effectuées par BRL, on observe sur le Tableau 2 que les ordres de grandeur des doses d'irrigation annuelles sont globalement respectés entre l'irrigation simulée et les préconisations de Gignac, notamment pour la vigne qui constitue la surface agricole majoritaire de la zone étudiée. Néanmoins, on obtient pour la majorité des cultures une consommation inférieure à celle préconisée par BRL. Ces différences sont analysées dans la Section 6.1.2.

TABLEAU 2 – Comparaison de l'irrigation annuelle simulée moyenne (entre 1993 et 2012) sur le bassin de l'Hérault à Gignac aux doses recommandées par BRL, calculées sur la base du climat à la station de Montpellier entre 1993 et 2012

	Irrigation simulée (mm)	**Irrigation BRL (mm)**
Colza	124	228
Maïs	307	476
Oliviers	88	302
Pomme de terre	126	106
Pommiers	323	643
Prairie	242	598
Tournesol	289	316
Vignes	61	50 à 100

5.2.2 Résultats et discussion des tests de sensibilité du modèle agronomique

Selon la variation des paramètres, la Figure C.2 (Annexe C) met en évidence :

- **des effets de décalage dans le temps des prélèvements :** c'est en particulier le cas quand la valeur de la RFU est modifiée, car le seuil de déficit entraînant le déclenchement de l'irrigation des cultures sera alors atteint plus ou moins rapidement, ou plus intuitivement quand la temporalité du cycle de culture est modifiée (date de semis, durée des cycles) ;
- **des effets sur la demande mensuelle en eau :** ils s'observent notamment si l'on fait varier la demande évaporative des cultures sur une période (variation des K_C, variation de la durée des cycles ou de la date des semis, entraînant un décalage dans le temps de la courbe des K_C). La taille de la RFU joue également, influençant la fréquence d'irrigation, mais aussi la dose d'irrigation selon les règles définies dans le Tableau B.1 (Annexe B). En effet, si la RFU diminue, le seuil de déclenchement de l'irrigation est plus facilement atteint, mais pour autant la dose d'irrigation, fonction de la RFU, diminuera également.
- **des effets sur la demande annuelle totale :** celle-ci est influencée par la demande instantanée au cours du cycle de culture, et par la longueur de ce cycle de culture. De plus, tous paramètres constants par ailleurs, le décalage de la date de début de cycle suffit à faire varier la DEI annuelle, puisque la courbe de K_C des cultures coïncidera ou non avec des périodes de forte ET_0.

L'influence de certains paramètres semble plus forte que pour d'autres. Aussi, une faible modification des K_C entraîne une forte variation de la demande annuelle en eau des cultures, alors qu'une augmentation ou une réduction par deux de la profondeur des racines, soit de la réserve utile, semble avoir un effet plus contenu. L'influence dépend de plus de l'intensité du changement imposée aux paramètres, qui a été choisie arbitrairement.

Il a été exposé en section 3.3 que nous disposions de différentes sources de données relatives à la construction des courbes de K_C : celles de la FAO (Allen et al., 1998), et celles de BRL (2018), et la prise en compte d'autres valeurs de K_C et de la temporalité du cycle pouvait significativement modifier la DEI. Nous choisissons donc d'exécuter le modèle agronomique pour toute la suite des travaux selon **deux jeux de paramètres agronomiques** :

- l'un prenant la courbe de K_C décrite dans les tables de la FAO pour les cultures qui y sont décrites de façon suffisamment explicite (vigne, oignon, blé, pommier, olivier, maïs, tournesol, pomme de terre) ;
- l'autre prenant la courbe de K_C décrite dans le Mémento de BRL (vigne, blé, pommier, olivier, maïs, tournesol, colza, pomme de terre, prairie).

Pour les cultures qui ne sont suffisamment détaillées que dans une seule source, on retient le paramétrage de cette unique source pour les deux jeux de paramètres. Ces deux jeux de paramètres font donc varier la valeur des K_C prises pour les différents stades, les dates de semis, et la longueur des différents stades.

5.2.3 Répartition temporelle et spatiale de la demande en eau agricole sur les sous-bassins

Pour les deux jeux de paramètres de la modélisation agronomique issus des données FAO et BRL (Section 5.2.2), on observe une saisonnalité sur l'ensemble des sous-bassins, avec un pic de demande en eau d'irrigation aux mois de juillet et août (Fig. 15). La demande en eau d'irrigation est majoritairement issue du bassin de l'Hérault à Gignac. Le bassin de Gignac présente également les écarts les plus importants entre le paramétrage de la FAO (Allen et al., 1998) et issu de BRL (2018).

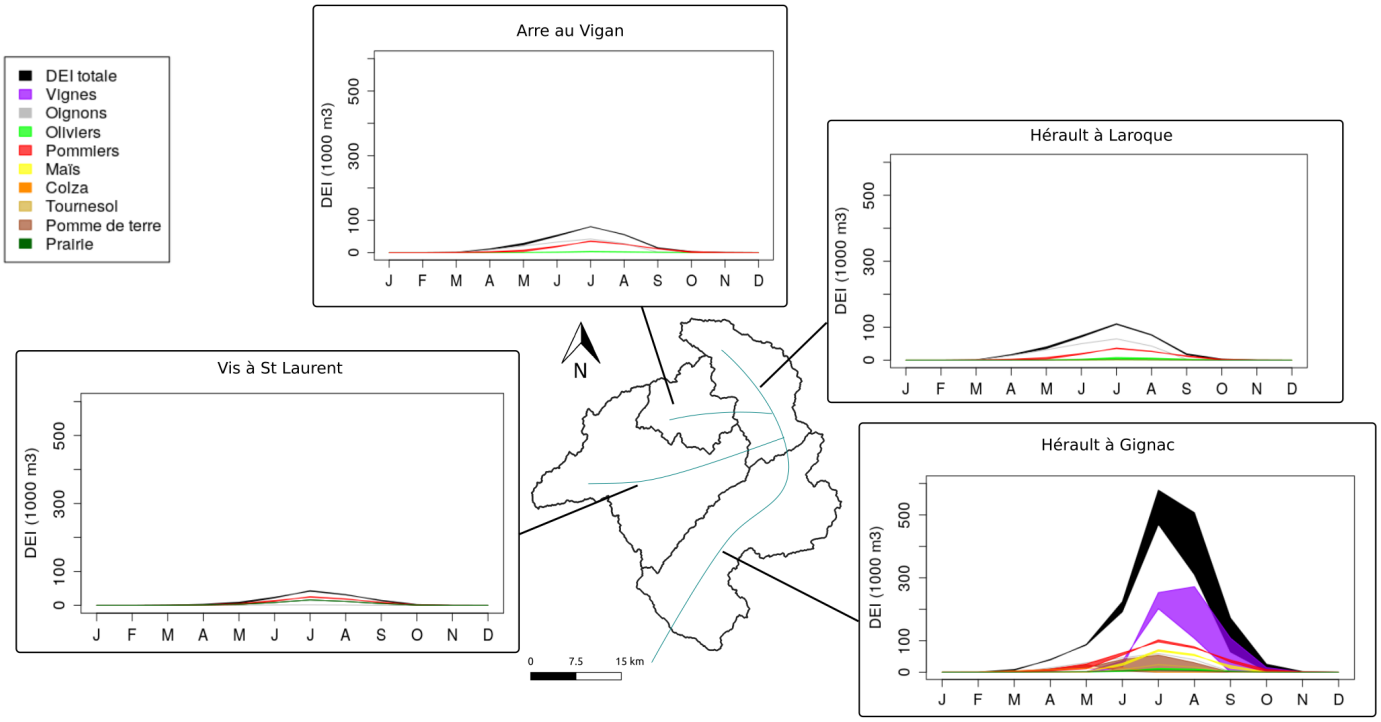


FIGURE 15 – Demande en eau moyenne mensuelle sur les sous-bassins versants étudiés avec la paramétrage FAO et BRL sur la période 1960-2018

5.2.4 Résultats de la simulation de la demande en eau d'irrigation et du stress hydrique sur la période historique

Les résultats de l'évolution de la demande en eau et du stress hydrique sont présentés seulement sur le bassin de l'Hérault à Gignac dans le corps du mémoire (Sections 5.2.4, 5.3), mais les résultats de l'ensemble des bassins sont présentés dans la Figure C.3 (Annexe C). Il est observé sur tous les bassins, et pour les deux jeux de paramètres retenus, une forte variabilité interannuelle de la demande en eau d'irrigation simulée, mais qui se répercute globalement par une tendance à la hausse des prélèvements d'après la régression linéaire (Fig. 17). De façon symétrique, le K_S des cultures non irriguées tend à diminuer avec les années, ce qui se traduit par une hausse du stress hydrique. D'après la Figure 17, la demande en eau obtenue pour le paramétrage de la FAO est généralement plutôt supérieure pour le bassin de l'Hérault à Gignac. Néanmoins, les ordres de grandeur d'irrigation annuelle sont bien conservés entre les deux simulations. Ces résultats sont analysés dans la Section 6.1.2.

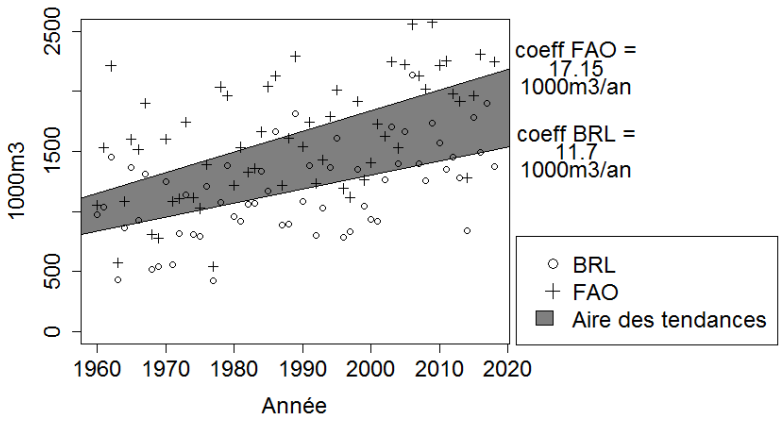


FIGURE 16 – DEI annuelle simulée et tendance selon le paramétrage de la FAO et de BRL

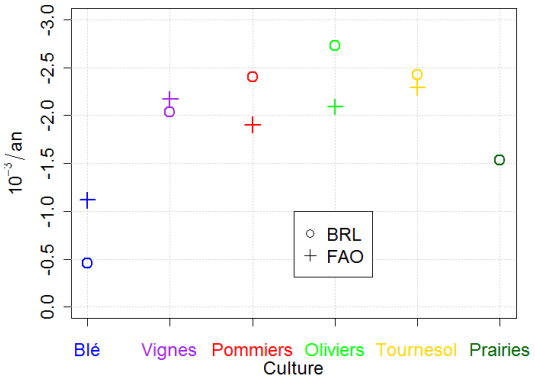


FIGURE 17 – Coefficient des droites de régression des K_S moyens annuels sur la durée du cycle de culture pour chaque culture non irriguée

5.3 Résultats du couplage agro-hydrologique

Dans cette section, le couplage entre modèle agronomique et modèle hydrologique est réalisé selon les 3 paramétrisations hydrologiques et les deux paramétrisations agronomiques retenues. Les résultats sont présentés sur le bassin de l'Hérault à Gignac, qui présente la plus forte demande, et qui cumule les effets des bassins amont sur son débit à l'exutoire. Les graphes sur l'ensemble des bassins sont présentés dans les Figures C.4 et C.5 (Annexe C).

5.3.1 Capacité à satisfaire la demande en eau agricole

Sur la période historique, la non-satisfaction de la demande en eau d'irrigation est très occasionnelle pour l'ensemble des simulations, et semble être davantage expliquée par les aléas de simulation, déclenchant sur une même journée l'irrigation sur la majorité des parcelles (ce point sera discuté en détail dans la Section 6.3.2). Aussi, le calcul d'une fréquence d'insatisfaction n'est pas envisageable.

En revanche, l'évolution de la capacité du bassin à satisfaire la DEI peut être étudiée à travers le rapport journalier entre l'irrigation I et le débit disponible Q (Figure 18). Plus ce rapport est élevé, plus il est difficile pour le bassin de satisfaire la demande en eau d'irrigation. Si à l'année, le rapport I/Q est très faible, notamment parce que les jours où la DEI est nulle sont nombreux, on observe toutefois une tendance pour l'ensemble des simulations à l'augmentation de cet indicateur, démontrant que la demande en eau d'irrigation tend à être plus difficile à satisfaire.

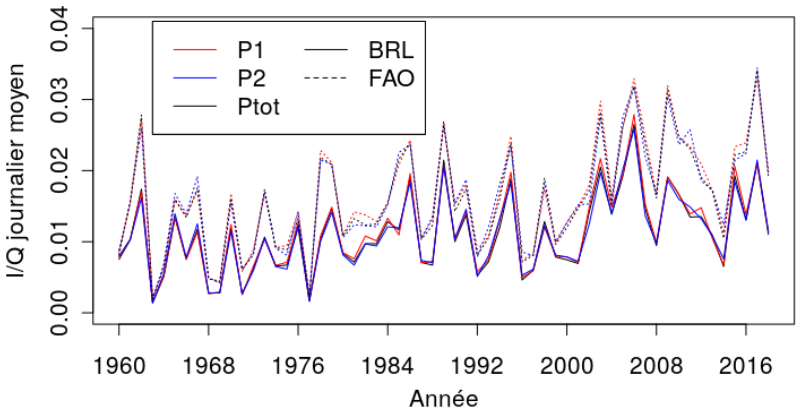
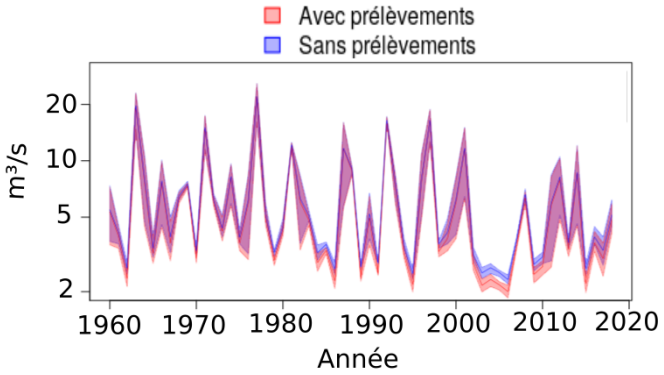


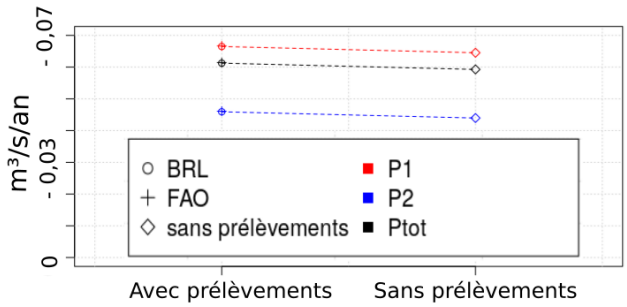
FIGURE 18 – Évolution de la moyenne annuelle du rapport I/Q sur le bassin de l'Hérault à Gignac

5.3.2 Impacts des prélèvements sur les débits

On observe un effet particulièrement prononcé des prélèvements lorsque les débits sont déjà faibles. De plus, la Figure 19b permet de comparer les coefficients directeurs des droites de régression des débits du mois de juillet en fonction de l'année. On retrouve la tendance à la diminution des débits estivaux sans prélèvements simulés déjà décrite en Section 5.1.2, et on détecte l'effet de l'augmentation des prélèvements, puisque la tendance à la diminution des débits est plus forte avec la simulation des prélèvements. On remarque que le choix de paramétrisation agronomique influe peu sur la tendance des débits par rapport à la variabilité induite par la paramétrisation hydrologique.



(a) Aire des débits moyens au mois de juillet à la station de l'Hérault à Gignac selon les 3 paramétrisations hydrologiques (en bleu et rouge) et selon les deux paramétrisations agronomiques (en rouge)



(b) Comparaison des coefficients directeurs des droites de régression des débits moyens de juillet simulés

FIGURE 19 – Effets des prélèvements simulés sur les débits pour l'ensemble des simulations

6 Discussion

6.1 Analyse des résultats

6.1.1 Analyse des résultats de la modélisation hydrologique

Lors de l'évaluation du modèle, il a été observé que l'erreur de modélisation par rapport aux données observées était plus forte sur Gignac que sur les autres bassins (Fig. 13). Cela peut s'expliquer par l'accumulation des erreurs des débits amont et du débit partiel en mode semi-distribué, et des débits globalement plus élevés, modifiant l'échelle de comparaison. Nous avions également observé une plus grande difficulté sur le sous-bassin de Gignac à représenter les débits de la période P_1. Cela peut s'expliquer par l'occurrence d'événements hydrologiques particuliers, difficiles à représenter, sur cette période.

Néanmoins, les valeurs prises par la fonction objectif sont satisfaisantes, à la fois sur les périodes de calage et de contrôle, d'autant qu'elle évalue la capacité du modèle à représenter les forts et les faibles débits, ce qui est un double objectif difficile à satisfaire pour un modèle hydrologique. Nous avons donc considéré que nos modélisations hydrologiques étaient performantes et satisfaisantes pour représenter la ressource en eau disponible.

6.1.2 Analyse des résultats de la modélisation agronomique

Les différences observées entre la DEI simulée et les prélèvements déclarés à l'Agence de l'eau s'expliquent par les raisons suivantes :

- **sur le sous-bassin de la Vis à Saint-Laurent-le-Minier :** absence d'irrigation collective sur ce site, si bien que les prélèvements des exploitations individuelles pourraient ne pas atteindre le seuil de déclaration ;
- **sur le sous-bassin de l'Hérault à Gignac :** les prélèvements effectués au niveau de ce bassin répondent en réalité à des besoins sur une aire très étendue en aval du bassin (Syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault, 2015), augmentant la surface irriguée à prendre en compte sur cette zone de prélèvements, et où les besoins sur les parcelles sont d'autant plus forts que le climat y est plus chaud et sec ;
- **sur l'ensemble des bassins :** à la fois l'incertitude liée aux données de prélèvements, notamment l'absence de déclaration pour certaines exploitations, et l'incertitude liée à la modélisation, notamment parce que les stratégies d'irrigation envisagées dans le modèle pourraient être trop faussées par rapport au comportement réel des agriculteurs. Il est en effet possible que les agriculteurs irriguent moins que le besoin biologique de la plante, préférant une légère perte de rendement, ou irriguent davantage que nécessaire.

Si les simulations ne permettent pas de représenter précisément les volumes déclarés à l'Agence de l'eau au titre des redevances, il est cependant admis qu'elles permettent :

- de suivre, au fil des sous-bassins traversés par l'Hérault, la demande en eau d'irrigation des cultures selon des stratégies d'irrigation théoriques et optimales sur ces sous-bassins ;
- et de comparer cette demande en eau d'irrigation au volume disponible dans le fleuve sur chaque sous-bassin.

Par ailleurs, les différences de demande en eau d'irrigation entre notre simulation et les recommandations de BRL peuvent s'expliquer :

- par un climat plus pluvieux sur l'amont du bassin de l'Hérault au printemps qu'à Montpellier, qui permet un rechargement de la RU à cette période ;
- par des températures moyennes par sous-bassin plus fraîches que le climat de Montpellier, notamment parce que nous travaillons sur des sous-bassins globalement situés en amont du bassin (Annexe A : Fig. A.1) ;
- par des hypothèses calculatoires différentes pour les estimations de BRL : les pluies inférieures à 10 mm ne sont prises en compte que s'il a déjà plu la veille, hypothèses différentes sur les propriétés du sol, simple bilan décadaire entre précipitations et évapotranspiration, sans prendre en compte la recharge réelle du sol en eau ni l'effet du stress hydrique sur l'évapotranspiration, etc.

La concentration de la DEI sur les mois d'été s'explique à la fois par le fait que la majorité des cultures est alors en stade de maturation, avec une forte demande évaporative, et par le fait qu'il s'agit de la période avec le plus faible apport en eau par les précipitations. La demande évaporative est donc complémentée par l'irrigation. De plus, la demande est principalement située sur le sous-bassin de l'Hérault à Gignac, à la fois parce qu'il concentre la majorité des surfaces agricoles, mais aussi parce qu'il subit le climat le plus chaud et sec. Les tendances à l'accentuation du stress hydrique et à la hausse de la DEI sur la période historique sont consistantes avec la constatation du changement climatique déjà réel. En effet, il a été calculé que la température moyenne mondiale sur la période 2015-2019 aurait déjà augmenté de plus de 1,1°C par rapport à la période 1850-1900 (OMM, 2019). Néanmoins, Collet et al. (2013) avaient simulé une baisse de la demande en eau d'irrigation sur la partie amont du bassin de l'Hérault, mais ce résultat s'explique par la prise en compte de la diminution des surfaces irriguées dans cette zone. Finalement, notre étude permet d'étudier spécifiquement l'effet du climat sur l'évolution de la demande en eau, en s'extrayant de la variabilité des surfaces irriguées.

6.1.3 Analyse des résultats du couplage agro-hydrologique

Une difficulté croissante à satisfaire la demande en eau a été observée avec nos simulations. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions établies par Collet et al. (2013) dans le bassin de l'Hérault, et McNider et al. (2014) sur le Sud des États-Unis, qui ont également observé la hausse de la difficulté à satisfaire la demande en eau sur la période historique, en cohérence avec le réchauffement climatique déjà observé (OMM, 2019).

De plus, nous avons observé que l'effet des prélèvements était plus fort lorsque les débits étaient faibles, ce qui s'explique par la prise en compte des mêmes données d'entrée pour la modélisation hydrologique et agronomique : une plus forte ETP et de plus faibles précipitations entraînent à la fois une baisse des débits, et une hausse de la DEI. Cela illustre bien le défi que constitue le changement climatique, qui aurait pour conséquence de diminuer la ressource en eau tout en augmentant la demande.

6.2 Les apports de la modélisation développée dans le mémoire

La modélisation couplée de la demande en eau agricole et du débit disponible sur un bassin versant développée dans le cadre du mémoire permet d'évaluer :

- la capacité à satisfaire la demande en eau des cultures, à la fois évaporative, par le calcul de K_S, et d'irrigation, par le rapport I/Q ;
- les effets sur les débits des prélèvements.

La modélisation permet donc d'étudier, selon des indicateurs adaptés, la vulnérabilité des bassins versants agricoles au climat, et à terme au changement climatique.

Des minima locaux de débit correspondant à des années de sécheresse et/ou chaleur intenses, durant lequel la demande agricole est forte, sont d'ailleurs repérables sur la Figure 19a : la sécheresse historique de 1976, la sécheresse moins connue mais néanmoins aigüe dans l'Hérault de 1986, la sécheresse de 1989, la canicule de 2003, la canicule de juillet 2006, la canicule de juillet 2015, etc (Ollivier, 1989 ; Mérillon and Chaperon, 1990 ; Ouest-France, 2019). Certaines années semblent indiquer un fort épisode de tension ne correspondant pas un épisode de sécheresse très connu (années 1995, 2004 et 2005, etc.), mais qui pourrait alors correspondre à un épisode de sécheresse local.

De plus, le modèle permet de détecter les effets du changement climatique passé (OMM, 2019) sur l'agriculture, avec des tendances à l'augmentation de la demande en eau, à l'augmentation du stress hydrique (diminution des K_S) et à la diminution des débits, ce qui montre la vulnérabilité de la zone étudiée au changement climatique.

De plus, par rapport à des approches plus anciennes comparables en termes de modèles utilisés (Milano, 2012 ; Collet, 2013), le modèle développé permet non seulement de caractériser la satisfaction de la demande en eau d'irrigation, mais aussi la satisfaction des besoins biologiques en eau des cultures par l'intermédiaire du calcul du coefficient de stress hydrique. Cet indicateur permet ainsi de ne pas limiter l'étude d'impacts aux simples cultures irriguées, mais aussi d'interroger les impacts sur les cultures pluviales, et d'évaluer la gravité de la non-satisfaction de la demande en eau sur une date donnée. De plus, cet indicateur peut ensuite être utilisé pour quantifier les effets sur les rendements (Steduto et al., 2012), ce qui permettrait de quantifier la vulnérabilité au changement climatique de façon très communicante auprès des acteurs du monde agricole.

Enfin, ce modèle est très parcimonieux par rapport à d'autres approches, telles que le modèle MAELIA (Thérond et al., 2014), ce qui permet une grande rapidité de simulation, et donc d'effectuer facilement plusieurs simulations selon plusieurs jeux de paramètres, et à terme de travailler selon une approche ensembliste.

De plus, le modèle codé avec le langage R permet une articulation fine entre les sorties du modèle

GR5J, et donne l'opportunité de raffiner le couplage entre modélisation hydrologique et agronomique par la suite.

6.3 Limites et perspectives d'amélioration de la modélisation développée

De nombreuses hypothèses et simplifications ont été effectuées dans la modélisation développée, ce qui génère des limites. Certaines de ces hypothèses et simplifications pourraient être levées grâce à des travaux complémentaires.

6.3.1 Limites et perspectives d'amélioration de la modélisation hydrologique

- **Le calage des débits partiels :** les modèles sont paramétrés selon un calage des débits partiels simulés en fonction des débits partiels observés, ce qui n'est pas optimal, considérant que la finalité de la modélisation hydrologique est de représenter les débits observés réels. Par la suite, le calage de la modélisation des débits partiels se fera à partir des débits réagrégés, en fonction des débits observés. Cette méthode de calage est celle utilisée pour le modèle GRSD (Lobligeois et al., 2014) ;
- **L'absence de naturalisation des débits :** la modélisation hydrologique est utilisée pour simuler le débit disponible pour l'irrigation. Or, les débits de sortie des modèles hydrologiques ont été calés selon des débits observés, déjà influencés par les prélèvements. Un travail de naturalisation des débits (Terrier et al., 2018), ou encore un calage du modèle couplé agro-hydrologique selon les débits influencés, comme réalisé dans MAELIA (Thérond et al., 2014), permettrait de simuler le débit réellement disponible pour l'irrigation dans le modèle couplé ;
- **L'absence de prise en compte des réserves d'eau :** l'approche résume les volumes disponibles pour l'irrigation au débit à l'exutoire des bassins versants, et ne permet donc pas de représenter le stock d'eau souterraine ou les retenues d'eau. La prise en compte des ressources souterraines ne paraît cependant pas essentielle, puisque les prélèvements pour l'irrigation sont actuellement à plus de 90% en surface pour les trois départements situés sur la zone d'étude, d'après les données de la banque nationale des prélévements quantitatifs en eau (BNPE, https://bnpe.eaufrance.fr/acces-donnees). Néanmoins, l'exploitation des ressources souterraines karstiques pourrait constituer une stratégie d'adaptation intéressante à étudier, et donc à quantifier (Collet, 2013).

6.3.2 Limites et perspectives d'amélioration de la modélisation agronomique

- **Les surfaces irriguées retenues par culture :** il serait nécessaire de faire varier l'assolement et la proportion de cultures irriguées dans le temps passé pour correspondre aux évolutions recensées, et d'établir des hypothèses d'évolution future pour les projections (Collet, 2013) ;
- **Les règles définissant le déclenchement et les doses d'irrigation sur les différentes cultures :** les règles retenues (Annexe B : Tab. B.1) correspondent à un schéma d'irrigation très rigoureux, correspondant à des recommandations précises (BRL, 2018) et supposant que l'agriculteur connaît parfaitement l'état du déficit hydrique dans le sol pour apporter la dose optimale. La réalité pourrait être différente, et un travail d'enquête auprès des acteurs du monde agricole pourrait être réalisé pour reproduire au mieux la réalité de l'irrigation effectuée sur le bassin ;
- **L'agrégation spatiale des données :** les cultures ont été soumises au climat moyen sur le sous-bassin, et le sol a également été considéré comme homogène sur l'ensemble des sous-bassins. Si cela se justifie par notre volonté de réaliser un modèle parcimonieux, l'étude de la sensibilité du modèle agronomique à la résolution spatiale des données d'entrée permettrait de mieux prendre en compte le biais induit par ce choix méthodologique (Hoffmann et al., 2016) ;
- **La distribution temporelle des prélèvements :** si l'étalement des dates de début de cycle permet bien une certaine répartition de l'irrigation, elle ne paraît pas suffisante pour simuler la

DEI de façon réaliste à un pas de temps journalier à l'échelle territoriale. En effet, les règles de déclenchement de l'irrigation, fonction de l'atteinte d'un seuil de déficit, ont tendance à concentrer le début des prélèvements annuels sur la même date pour un grand nombre de parcelles, concentrant par la suite du cycle les prélèvements sur certaines journées. Il serait souhaitable de mieux étaler les prélèvements journaliers, soit en contraignant plus strictement la répartition temporelle, ou bien en effectuant un couplage réagrégé à un pas de temps plus grand (Milano, 2012 ; Collet, 2013 ; McNider, 2014) ;

- **Les simplifications du modèle sol-plante-atmosphère :** des approches décomposent notamment le calcul de l'ET_C en un calcul de transpiration et d'évaporation (e.g. dual crop coefficient, Allen et al., 1998 ; AquaCrop, Steduto et al., 2009 ; MAELIA, Thérond et al., 2014). Des modèles permettent également de prendre en compte la variabilité de la durée des cycles des cultures en fonction du climat. Le modèle pourrait aussi, à l'avenir, faire varier la profondeur racinaire et le facteur de puisement au cours des cycles de culture. Une approche simplifiée n'est pas un problème en soi, mais il serait nécessaire d'analyser la variabilité liée à la prise en compte ou non de certaines variables.

6.3.3 Limites et perspectives d'amélioration du couplage

En plus des limites déjà évoquées qui se répercutent sur la stratégie de couplage (répartition temporelle des prélèvements, naturalisation des débits de calage, etc.), un certain nombre de limites sont inhérentes aux hypothèses de couplage :

- **Décorrélation spatiale des zones de demande - zones de prélèvement :** dans la modélisation développée dans le mémoire, seule la demande au niveau des bassins versants a été prise en compte. Pourtant, de l'eau peut être prélevée au niveau d'un bassin et consommée ailleurs. C'est notamment le cas pour l'ASA de Gignac qui bénéficie d'un canal partant du bassin de l'Hérault à Gignac, et approvisionnant une grand secteur aval, constituant vraisemblablement la majorité de la demande (Syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault, 2015). Un travail de réattribution des zones de demande au bassin versant prélevé devra donc être réalisé (Collet, 2013 ; Sauquet et al., 2014) ;
- **Décorrélation entre eau prélevée et eau consommée :** dans ce travail, seuls les prélèvements nets, soit l'eau demandée pour l'irrigation et les pertes liées à l'infiltration dans les nappes, ont été pris en compte pour estimer les prélèvements agricoles. Cela permet de s'extraire de la simulation hydraulique des canaux. En réalité, les prélèvements bruts dans les cours d'eau simulés sont supérieurs, puisque de l'eau est dérivée par des canaux, puis rejetée en aval ;
- **Simulation des pertes :** les pertes en eau d'irrigation sont envoyées le jour-même des prélèvements à l'exutoire du bassin. D'autres hypothèses de simulation pourraient être envisagées : effet de décalage temporel, transfert de l'eau dans un réservoir du modèle plutôt que directement à l'exutoire, etc.
- **Renforcement du couplage :** les sorties de la modélisation agronomique (humidité du sol, ruissellement, évapotranspiration, etc.) pourraient être utilisées dans la fonction de production du modèle hydrologique (e.g. AquaCrop-Hydro, Van Gaelen, 2016), pour s'assurer de la cohérence entre les deux simulations.

7 Conclusion et perspectives

Ce mémoire a porté sur le développement d'un modèle couplé agro-hydrologique parcimonieux, mobilisable par la suite dans des études d'impacts du changement climatique sur les bassins versants agricoles. Le modèle développé couple le modèle agronomique CropWat (Allen et al., 1998) et le modèle hydrologique GR5J (Le Moine, 2008) au pas de temps journalier. Les expérimentations réalisées ont permis d'étudier la réactivité du modèle couplé au climat sur la période 1960-2018 pour une image fixe de l'agriculture. Nous avons ainsi pu constater que cette approche permettait de visualiser les effets des prélèvements sur les débits, la capacité d'un bassin à répondre à la demande en eau d'irrigation des cultures, et les effets de la stratégie d'irrigation sur le stress hydrique des cultures présentes, et ce avec un temps de simulation court. Ce modèle permet donc de quantifier la vulnérabilité des bassins versants agricoles au changement climatique.

Une thèse fera suite à ce travail de mémoire. De nouveaux modèles seront alors utilisés, en plus du modèle développé, afin de travailler selon une approche multi-modèle. Cette approche permettra d'étudier l'intérêt d'un gain en complexité des modèles, et de mieux quantifier les incertitudes. L'approche sera ensuite mise à profit pour effectuer des études d'impact du changement climatique sur l'agriculture. Cela permettra d'estimer s'il sera possible de répondre à la demande en eau future selon différents scénarios climatiques et différents scénarios d'évolution de l'agriculture, et de tester l'efficacité de stratégies d'adaptation. Ainsi, le travail pourra être complété par la simulation de retenues d'eau, ou par un changement des assolements au profit de cultures moins consommatrices d'eau.

8 Bibliographie

Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, DREAL Délégation du bassin Rhône Méditerranée, 2014. Plan de bassin d'adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau (Rapport). https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2017-05/2014-plan-bassin-changement-climatique.pdf

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines cor computing cropwater requirements ; In : FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization, Rome. http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm

Blinda, M., Thivet, G., 2009. Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspectives. Sécheresse, 20(1), 9-16. https://doi.org/0.1684/sec.2009.0162

Boé, J., 2007. Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France (Thèse de Doctorat). Université Paul Sabatier - Toulouse III. http://thesesups.ups-tlse.fr/227/1/Boe_Julien.pdf

BRL - Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc, 2018. Mémento Irrigation (Note technique). https://www.brl.fr/maj/phototheque/photos/pdf/2018/memento_2018_flipbook.pdf

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. European Journal of Agronomy 18, 309–332. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7

Brisson, N., Levrault, F., 2010. Livre vert du projet Climator 2007-2020. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces, ADEME Editions. Paris, FRANCE. https://www.ademe.fr/green-book-of-the-climator-project-the

Carroget, A., 2017. Explore 2070 : quelle utilisation d'un exercice prospectif sur les impacts des changements climatiques à l'échelle nationale pour définir des stratégies d'adaptation ? Sciences Eaux & Territoires 22, 8, https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2017.22.02

Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., De Lacaze, X., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? La Houille Blanche 5–15. https://doi.org/10.1051/lhb/2013027

Collet, L., 2013. Capacité à satisfaire la demande en eau sous contraintes climatique et anthropique sur un bassin méditerranéen (Thèse de doctorat). Université Montpellier 2, Montpellier. https://www.theses.fr/2013MON20129

Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Dezetter, A., Servat, E., 2013. Integrated modelling to assess long-term water supply capacity of a meso-scale Mediterranean catchment. Science of The Total Environment 461–462, 528–540. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.036

Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Dezetter, A., Servat, E., 2015. Water supply sustainability and adaptation strategies under anthropogenic and climatic changes of a meso-scale Mediterranean catchment. Science of The Total Environment 536, 589–602. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.093

Conseil d'Etat, 2010. Rapport public 2010 – Volume 2 : L'eau et son droit. https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/104000255.pdf

Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., 2017. The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. Environmental Modelling and Software, 94, 166-171. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002

Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Perrin, C. and Michel, C. (2020). airGR : Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.4.3.65. https://doi.org/10.15454/EX11NA, https://CRAN.R-project.org/package=airGR

Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., Bourgin, P.Y., 2020. Base de données d'observations hydroclimatiques à l'échelle de bassins versants français. Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Équipe Hydrologie des bassins versants, Antony. https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees

European Environment Agency, 2017. Uncertainty guidance - Topic 1 : What is meant by uncertainty ? https://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/uncertainty-guidance/topic1/index_html/

Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. Geophys. Res. Lett. 33(8), L08707. https://doi.org/10.1029/2006GL025734

Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology 377, 80-91. https://doi.

org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., Viennot, P., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, J. Geophys. Res.-Atmos., 113, D06113. https://doi.org/10.1029/2007JD008548

Hawkins, E., Sutton, R., 2009. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 1095–1108. https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1

Hoffmann, H., Zhao, G., Asseng, S., Bindi, M., Biernath, C., Constantin, J., Coucheney, E., Dechow, R., Doro, L., Eckersten, H., Gaiser, T., Grosz, B., Heinlein, F., Kassie, B.T., Kersebaum, K.-C., Klein, C., Kuhnert, M., Lewan, E., Moriondo, M., Nendel, C., Priesack, E., Raynal, H., Roggero, P.P., Rötter, R.P., Siebert, S., Specka, X., Tao, F., Teixeira, E., Trombi, G., Wallach, D., Weihermüller, L., Yeluripati, J., Ewert, F., 2016. Impact of Spatial Soil and Climate Input Data Aggregation on Regional Yield Simulations. PLoS ONE 11, e0151782. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151782

Hrachowitz, M., Clark, M.P., 2017. HESS Opinions : The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. Hydrol. Earth Syst. Sci. 21, 3953–3973. https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017

IPCC, 2014. Summary for Policymakers. In : Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White. ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2007. Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. ed. IPCC, Geneva, Switzerland.

Jones, C.A., Kiniry, J.R., Dyke, P.T., 1986. Ceres-N Maize : a simulation model of maize growth and development, Texas A&M University Press, College Station, Temple, TX.

Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A., Jones, R.G., 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts : flood frequency in England. Climatic Change 92, 41–63. https://doi.org/10.1007/s10584-008-9471-4

Klemes, 1986. Operational testing of hydrological simulation models, Hydrological Sciences Journal, 31 :1, 13-24. https://doi.org/10.1080/02626668609491024

Le Moine, N., 2008. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? (Thèse de doctorat). Université Pierre et Marie Curie, Paris. http://www.theses.fr/2008PA066468

Leenhardt, D., Thérond, O., Mignolet, C., 2012. Quelle représentation des systèmes de culture pour la gestion de l'eau sur un grand territoire ? Agronomie Environnement et Sociétés 2, 77–89. https://prodinra.inra.fr/ft?id={1B8109BD-FD28-4AF8-9FAF-E99BBC0FE7D2}&original=true

Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., Gouin, P., Viquendi, I., Cobos, L., Foray, A., Baillon, M., Ndima, P.O., 2014. La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. La Houille Blanche, 25-32. https://doi.org/10.1051/lhb/2014004

Lobligeois, F., Andréassian, V., Perrin, C., Tabary, P., Loumagne, C., 2014. When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation ? An evaluation using 3620 flood events. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18, 575–594. https://doi.org/10.5194/hess-18-575-2014

McNider, R.T., Handyside, C., Doty, K., Ellenburg, W.L.,. Cruise, J.F, Christy, J.R., Moss, D., Sharda, V., Hoogenboom, G., Caldwell, P., 2014. An integrated crop and hydrologic modeling system to estimate hydrologic impacts of crop irrigation demands. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.10.009

Mérillon, Y., Chaperon, P., 1990. La sécheresse de 1989, La Houille Blanche, 5, 325-340. https://doi.org/10.1051/lhb/1990025

Milano, M., 2012. Changements globaux en Méditerranée : Impacts sur le stress hydrique et la capacité à satisfaire les demandes en eau (Thèse de doctorat). Université de Montpellier 2. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-08/010062207.pdf

Mitchell, T.D., Hulme, M., 1999. Predicting regional climate change : living with uncertainty. Progress in Physical Geography : Earth and Environment, 23(1), 57–78. https://doi.org/10.1177/030913339902300103

MTES, MAA, http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp

Ollivier, J.Y., 1989. Conséquences des sécheresses 1985 et 1986 dans le Sud-Ouest de la France : Elaboration d'un programme de lutte, La Houille Blanche, 7-8, 530-533. https://doi.org/10.1051/lhb/1989052

Ouest-France, 2019. Chronologie. De 1976 à 2019, la France face à plusieurs sécheresses mémorables (Article de presse), Ouest-France. https://www.ouest-france.fr/meteo/secheresse/chronologie-de-1976-2019-la-france-face-plusieurs-secheresses-memorables-6457384

Organisation Météorologique Mondiale, 2019. United in Sciences (Rapport). https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/le-rapport-phare-united-science-%C3%A9claire-le-sommet-action-climat

Ortiz-Bobea, A., Wang, H., Carrillo, C.M. and Ault, T.R., 2019. Unpacking the climatic drivers of US agricultural yields. Environ. Res. Let. 14, 064003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1e75

Oudin, L.,Hervieu, F., Michel, C.,Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagnea, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model ? : Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. Journal of Hydrology 303, 290-306. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279, 275–289. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) (Rapport). https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Modeles_GR_Resume.pdf

Sauquet, E., Arama, Y., Blanc Coutagne, E., Bouscasse, H., Branger, F., Braud, I., Brun, J.F., Cherel, J., Cipriani, T., Datry, T., Ducharne, A., Hendrickx, F., Hingray, B., Krowicki, F., Le Goff, I., Le Lay, M., Magand, C., Malerbe, F., Mathevet, T., Monteil, C., Perrin, C., Poulhe, P., Rossi, A., Samie, R., Strosser, P., Thirel, G., Tilmant, F., Vidal, J.P., 2014. Projet R2D2 2050 - Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050 - Rapport de fin de contrat (Rapport). http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0082/Temis-0082303/22047.pdf

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D., 2009. Crop yield response to water. In : FAO Irrigation and drainage paper 66. Food and Agriculture Organization, Rome. http://www.fao.org/3/i2800e/i2800e.pdf

Syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault (actuel EPTB fleuve Hérault), 2015. Elaboration du schéma directeur de la ressource en eau sur le basin de l'Hérault – Détermination de la ressource en eau sur le bassin de l'Hérault – Actualisation du bilan des prélèvements (phase 1) (Rapport).

Terrier, M., Perrin, C., Thirel, G., 2018. Projet Chimère 21 - Vers une estimation des débits naturels sur le bassin versant de la Meuse (Rapport). https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2019/06/Rapport_Naturalisation_CHIMERE21_vfinale.pdf

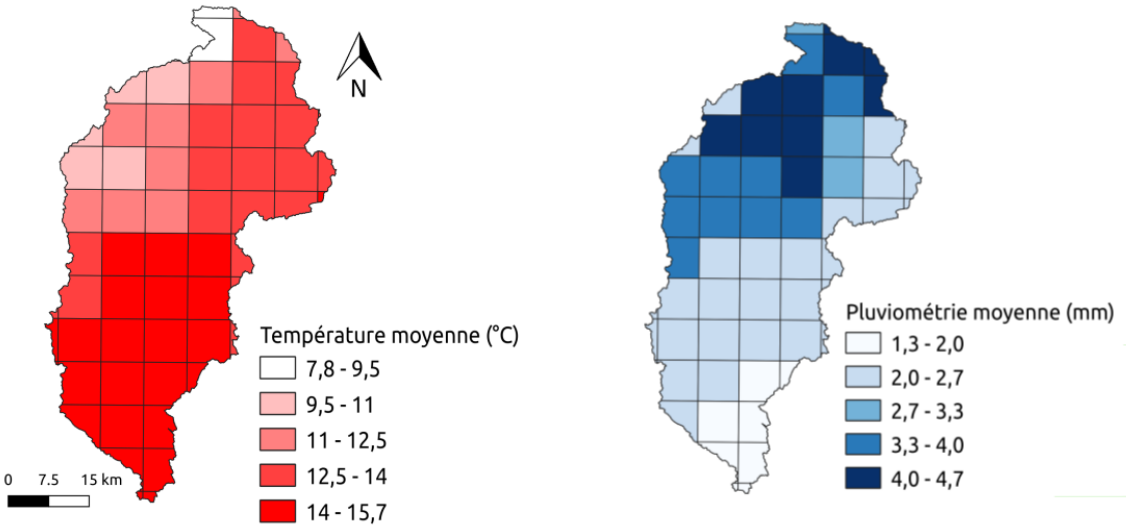
Thérond, O., Sibertin-Blanc, C., Lardy, R., Gaudou, B., Balestrat, M., Hong, Y., Louail, T., Nguyen, V.B., Panzoli, D., Sanchez-Pérez, J.-M., Sauvage, S., Taillandier, P., Vavasseur, M., Mazzega, P., 2014. Integrated modelling of social- ecological systems : The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems, 8. https://www.researchgate.net/publication/263424268_Integrated_modelling_of_social-ecological_systems_The_MAELIA_high-resolution_multi-agent_platform_to_deal_with_water_scarcity_problems

Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C.,2015. On the need to test hydrological models under changing conditions, Hydrological Sciences Journal, 60, 1165-1173, https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1050027

Vidal, J.P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-year high resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International Journal of Climatology, 30(11), 1627–1644. https://doi.org/10.1002/joc.2003

Annexes

A Données d'entrée



(a) Température moyenne

(b) Pluviométrie journalière moyenne

FIGURE A.1 – Climat du bassin versant de l'Hérault (SAFRAN 2009-2019)

TABLEAU A.1 – Profondeur de racines Z_r (m) et facteur de puisement p (-) pour les cultures présentes sur le bassin. *Sources : Mémento BRL (2018), FAO (Allen et al., 1998) pour l'oignon*

	Blé	**Colza**	**Maïs**	**Oignon**	**Olivier**	**Pomme de terre**	**Pommier**	**Prairie**	**Tournesol**	**Vigne**
Z_r	1,15	0,9	0,8	0,45	0,8	0,5	0,85	0,85	1,25	1
p	0,55	0,6	0,55	0,3	0,65	0,35	0,5	0,6	0,45	0,45

TABLEAU A.2 – Période de démarrage du cycle cultural par culture irriguée. *Sources : Mémento BRL (2018), FAO (Allen et al., 1998) pour l'oignon*

Culture	**Dates de début de cycle**
Colza	21 – 30 septembre
Maïs	1^{er} – 10 mai
Oignons	1^{er} – 10 avril
Oliviers	1^{er} – 10 avril
Pomme de terre	1^{er} – 10 mars
Pommiers	1^{er} – 10 avril
Prairies	1^{er} – 10 janvier
Tournesol	21 – 30 avril
Vignes	20 – 29 avril

TABLEAU A.3 – Propriétés du sol du bassin versant de l'Hérault, avec ω_{CC} la capacité au champ, ω_{PF} la capacité au point de flétrissement, ρ_a la masse volumique apparente du sol, T_p la pierrosité. *Source : Collet, 2013*

$\omega_{CC} - \omega_{PF}$	ρ_a	T_P
0,13 kg/kg	1,55 g/cm^3	0,5 m^3/m^3

B Fonctionnement du modèle agronomique

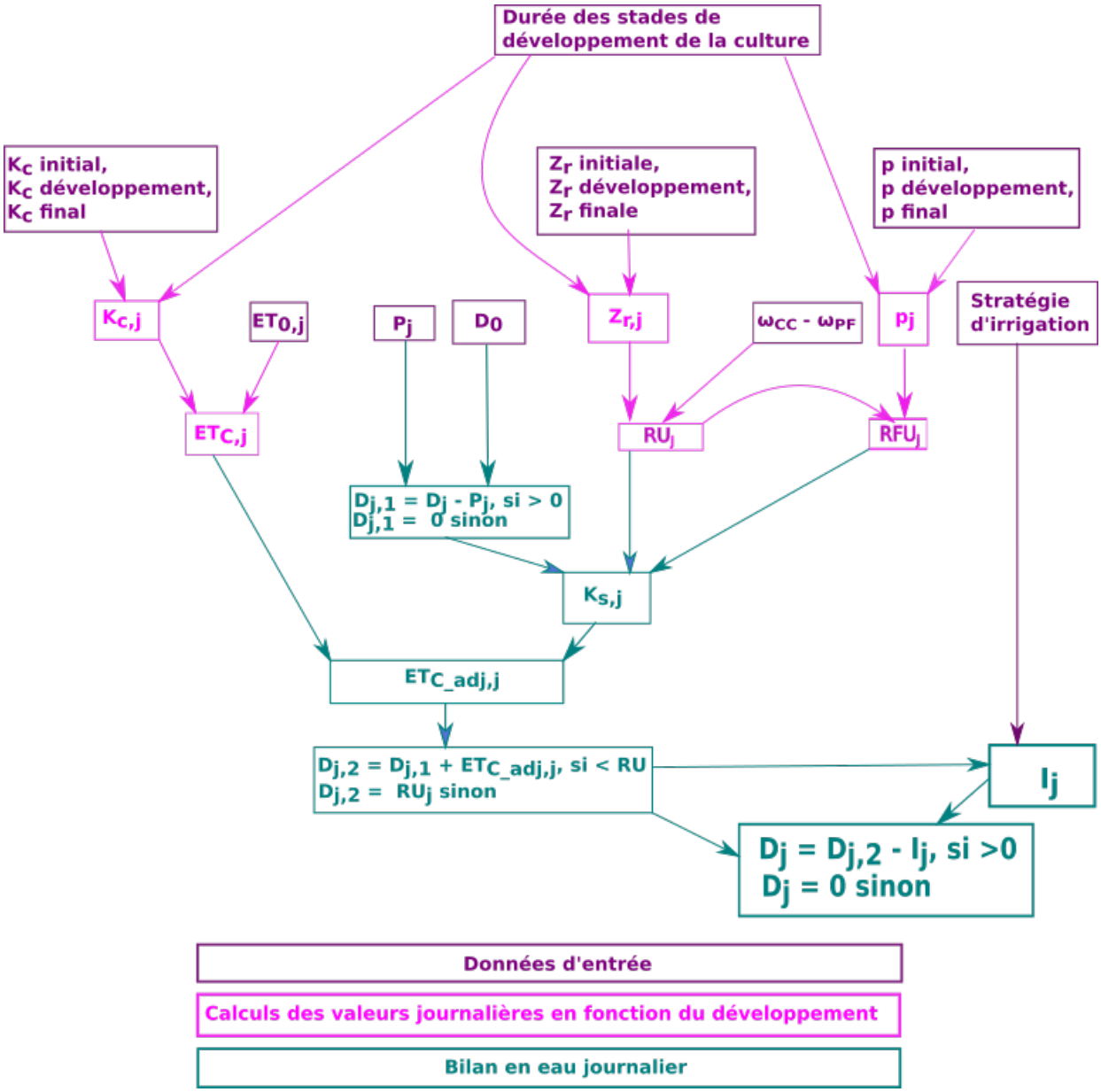


FIGURE B.1 – Etapes de calcul du bilan en eau journalier par CropWat

TABLEAU B.1 – Résumé des règles d'irrigation retenues par culture

Cultures	Déclenchement de l'irrigation	Fréquence d'irrigation	Dose d'irrigation
Vignes, Oliviers	D $\geq$ RFU L'irrigation est déclenchée quand toute la RFU a été consommée	Tous les 10 jours	D - RFU On remplit la réserve en eau du sol en gardant un déficit égal à la RFU
Maraîchage : oignons, pommes-de-terre	Dès le semis	D $\geq$ RFU L'irrigation se fait à chaque fois que le déficit hydrique atteint la RFU	D On remplit la réserve en eau du sol à capacité au champ
Autres cultures	D $\geq$ 0,5 $\times$ RFU L'irrigation est déclenchée quand la moitié de la RFU a été consommée	Tous les 10 jours	D - 0,5$\times$ RFU On remplit la réserve en eau du sol en gardant un déficit égal à la moitié de la RFU

C Résultats de la modélisation

TABLEAU C.1 – Performance des calages obtenues sur les différents sous-bassins étudiés selon la fonction objectif composite définie dans l'Equation 4, Section 4.1

Station	**Calage**	**F_{obj} sur la période de calage**	**F_{obj} sur la période de contrôle**
Arre au Vigan	Calage sur P_{tot}	0,79	-
	Calage sur P_1	0,81	0,67
	Calage sur P_2	0,77	0,72
Vis à St Laurent	Calage sur P_{tot}	0,87	-
	Calage sur P_1	0,87	0,82
	Calage sur P_2	0,85	0,85
Hérault à Laroque	Calage sur P_{tot}	0,89	-
	Calage sur P_1	0,89	0,87
	Calage sur P_2	0,85	0,84
Hérault à Gignac	Calage sur P_{tot}	0,89	-
	Calage sur P_1	0,68	0,76
	Calage sur P_2	0,80	0,73

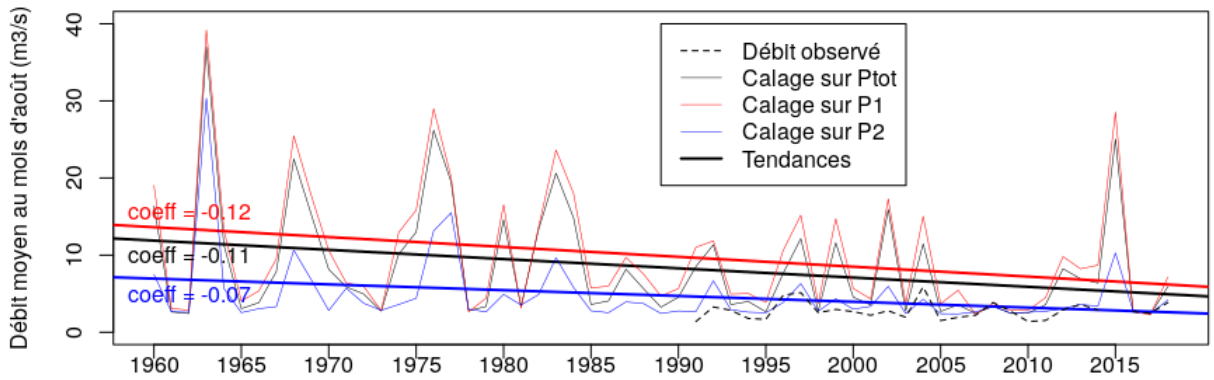


FIGURE C.1 – Evolution des débits moyens du mois d'août sur la station de l'Hérault à Gignac (1960-2018)

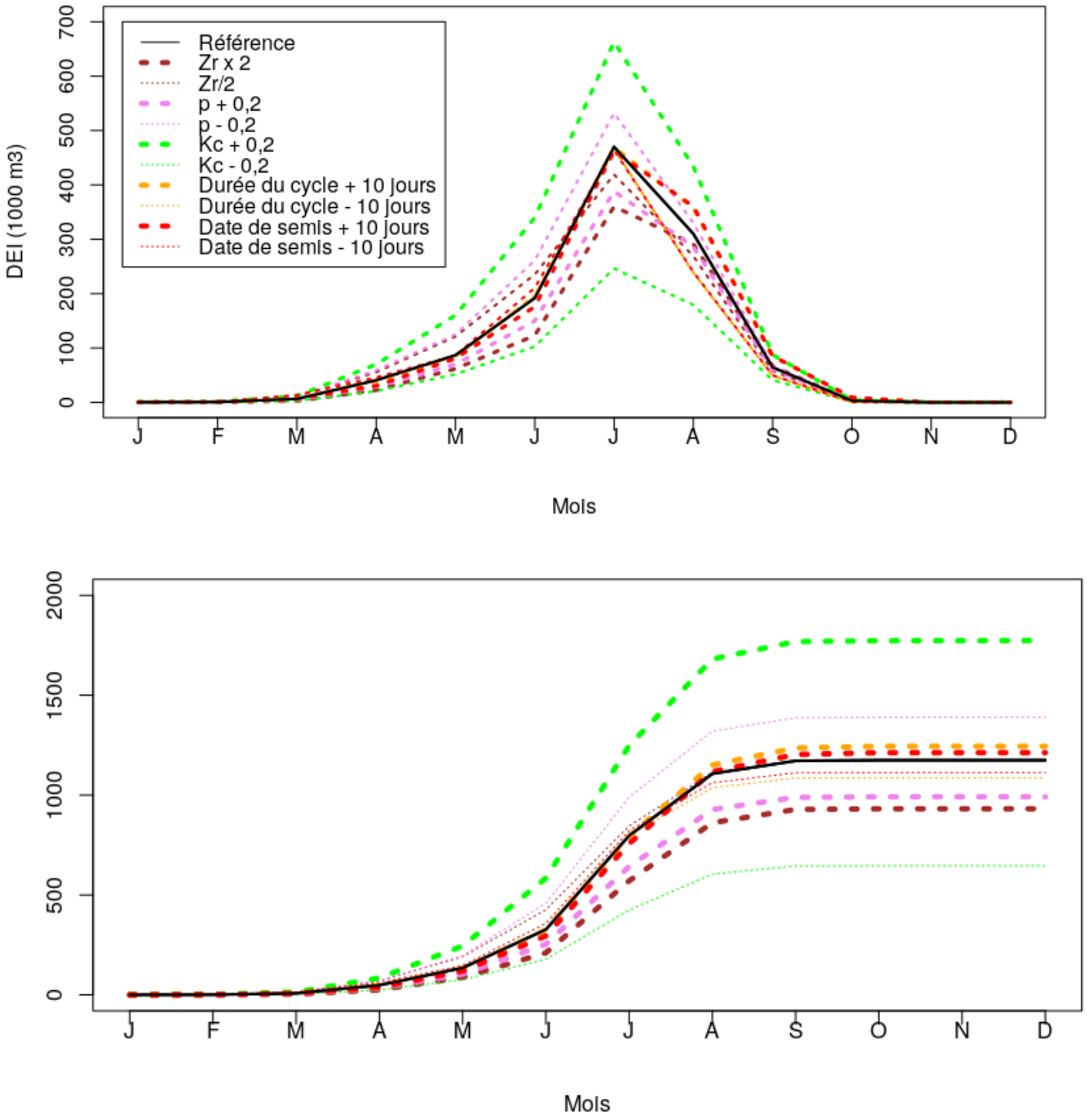


FIGURE C.2 – Effets moyens de la variation des paramètres du modèle agronomique sur la DEI (1960-2018) sur le sous-bassins de Gignac. En haut : la DEI par mois ; en bas : la DEI cumulée

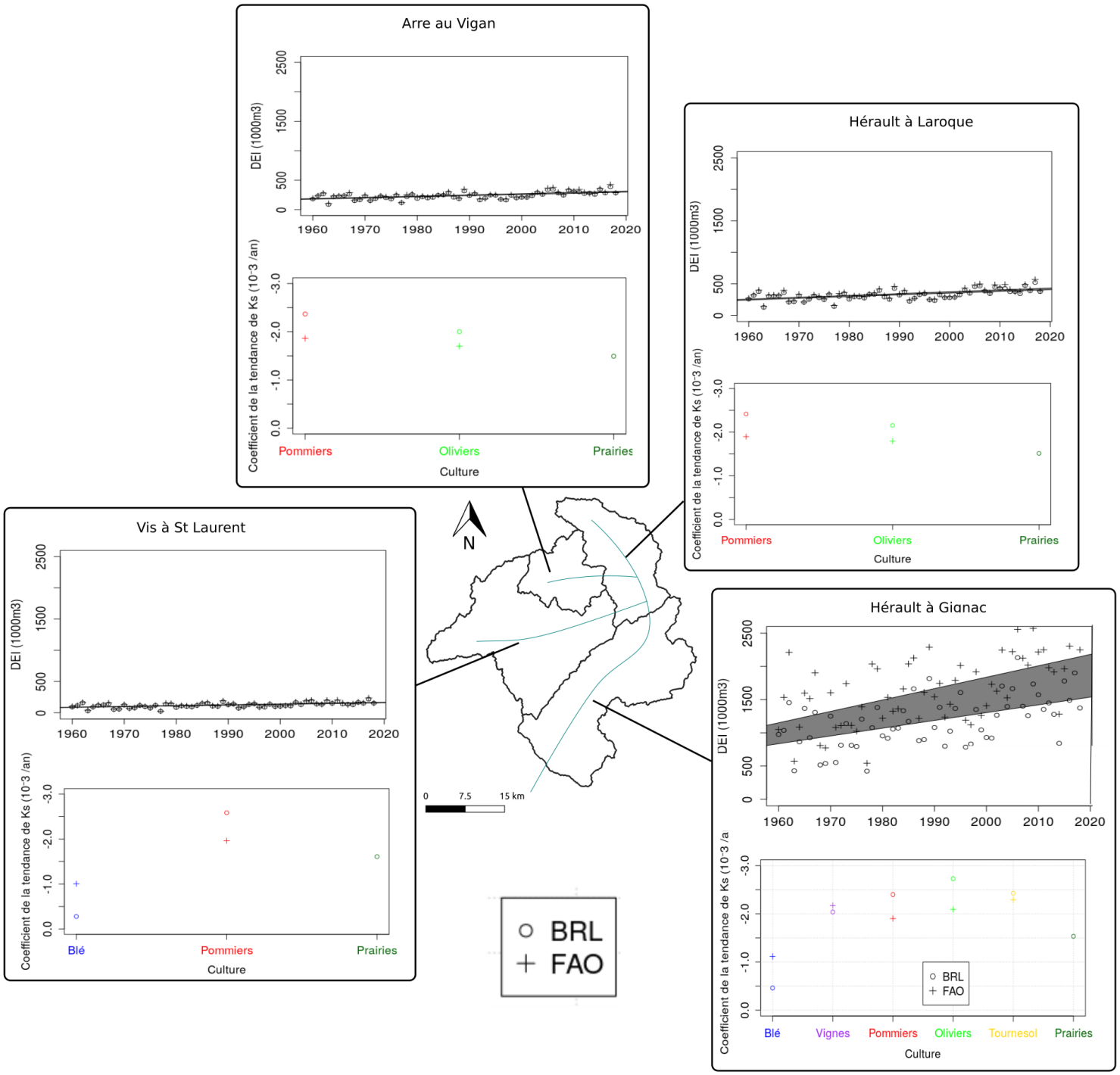


FIGURE C.3 – Tendance de la DEI et des Ks sur tous les sous-bassins pour les deux jeux de paramètres de la modélisation agronomique

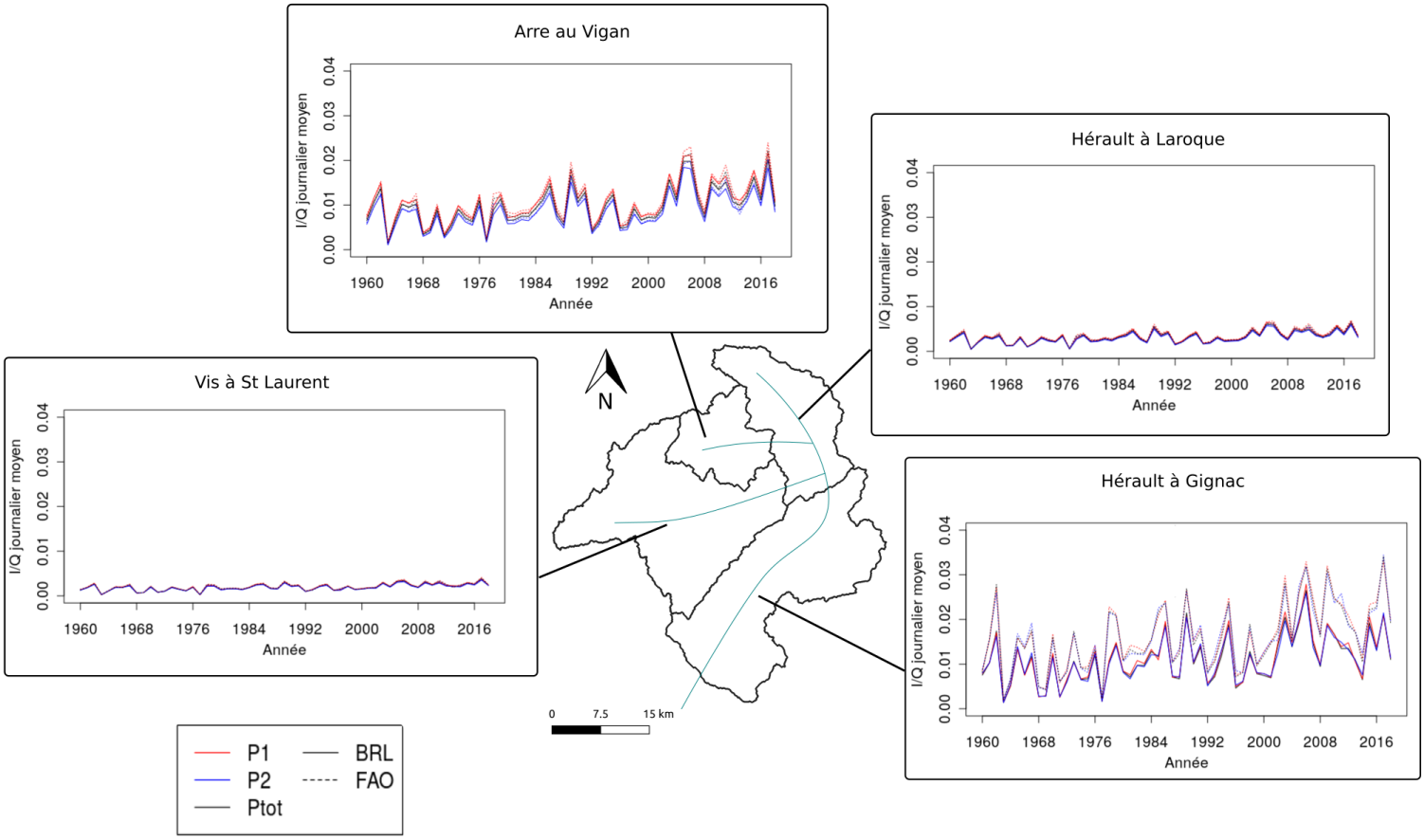


FIGURE C.4 – Moyennes annuelles des rapports I/Q journaliers sur tous les sous-bassins pour les trois paramétrisations hydrologiques et les deux paramètres agronomiques

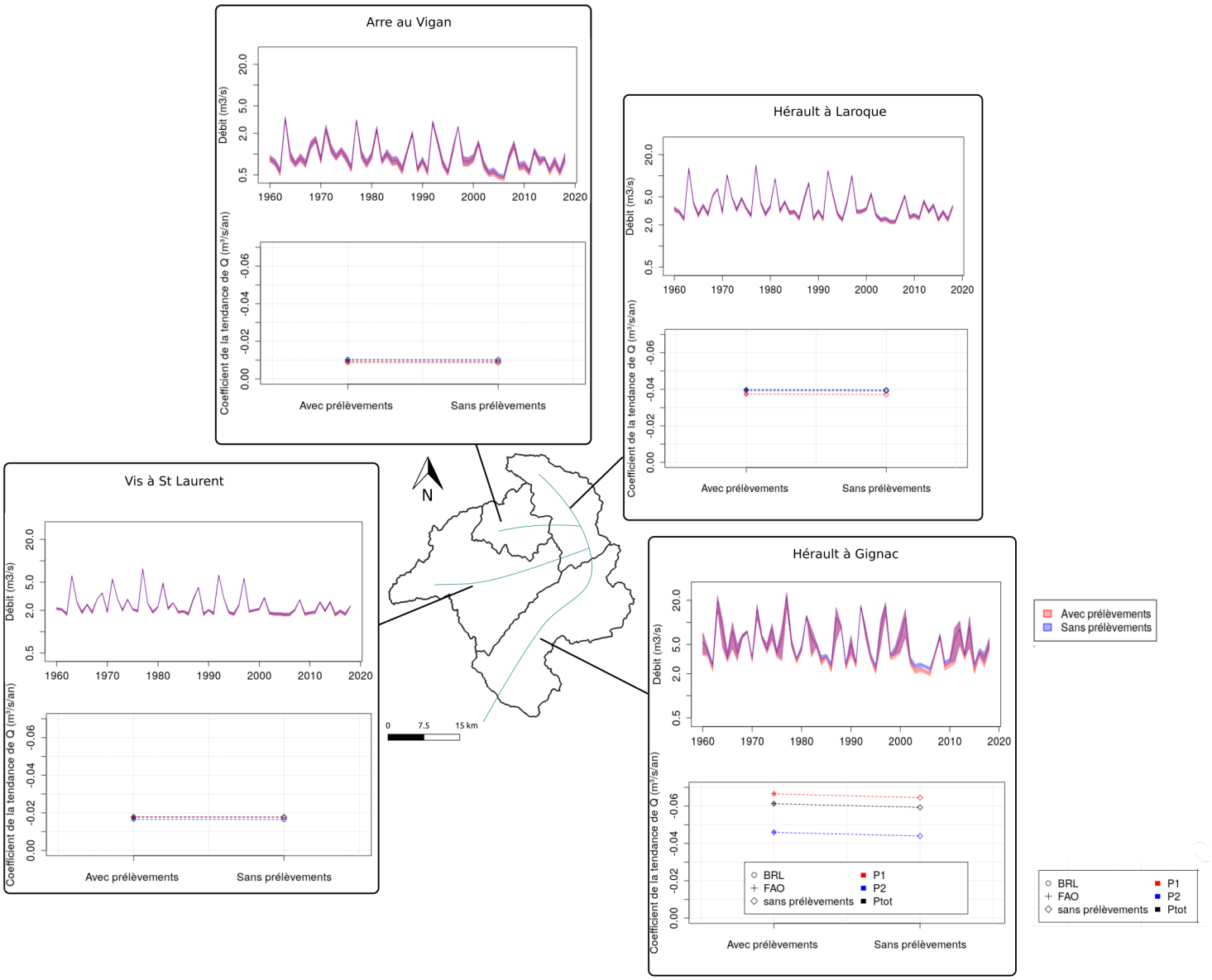


FIGURE C.5 – Impact des prélèvements sur les débits sur les sous-bassins selon les 3 paramétrisations hydrologiques et selon les les 2 paramétrisations agronomiques

Résumé

A l'aube du changement global, les tensions sur la ressource en eau sont de plus en plus fortes à échelle mondiale, et ce de façon particulièrement aigüe sur le pourtour méditerranéen. Le secteur agricole paraît très vulnérable au changement climatique : la hausse des températures a pour effet une hausse de l'évapotranspiration, ce qui entraîne à la fois une diminution de la ressource en eau et une hausse de la demande en eau des cultures. Pour quantifier la vulnérabilité du secteur agricole sur un territoire donné, il convient de mettre au point une chaîne de modélisation d'impacts, partant de données climatiques, et informant sur la capacité d'un bassin versant à répondre à la demande en eau future. Néanmoins, selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et les modèles choisis dans la chaîne de modélisation d'impacts, les résultats peuvent être différents, illustrant ainsi l'incertitude inhérente à tout travail de modélisation et simulation.

Dans le cadre de ce mémoire, un couplage entre modélisation hydrologique et modélisation agronomique parcimonieuses a ainsi été mis au point sur l'amont du bassin versant de l'Hérault, en France métropolitaine. Les prélèvements pour l'irrigation sont simulés à l'aide du modèle de la FAO à un coefficient (Allen et al., 1998), les débits sont simulés à l'aide du modèle GR5J semi-distribué (Le Moine et al, 2008). Au pas de temps journalier, les débits à l'exutoire des sous-bassins considérés sont soumis aux prélèvements pour l'irrigation, dans la limite du volume disponible. Cette modélisation couplée a été soumise au climat de la période 1960-2018, et selon une représentation de l'assolement agricole de 2010. Cette expérience a permis d'interroger l'aptitude du modèle à représenter la capacité du bassin versant à répondre à la demande en eau des cultures, et les effets des prélèvements sur les débits, dans un contexte de changement climatique et sur une longue période. La simplicité des modèles utilisés permet de réaliser plusieurs simulations selon différents jeux de paramètres, et ainsi d'obtenir une image plus exhaustive des possibles. Selon nos hypothèses de simulation, les prélèvements tendent notamment à augmenter de 11700 à 17160 m^3 par an sur le sous bassin de l'Hérault à Gignac, parallèlement à une tendance à la diminution des débits disponibles, ce qui se traduit par une difficulté croissante à satisfaire la demande en eau pour l'irrigation.

L'utilisation de plusieurs modèles hydrologiques et agronomiques permettra de mieux prendre en compte l'incertitude de modélisation. A terme, l'approche développée permettra un diagnostic de la vulnérabilité de bassins versants au changement climatique, et l'évaluation de stratégies d'adaptation.