



HAL
open science

**Effet de la connectivité hydrologique sur l'efficience de
l'eau des cultures pluviales méditerranéennes
modélisation et analyse de scénarios - cas du bassin
versant de Kamech, Tunisie**

Mariem Dhouib

► **To cite this version:**

Mariem Dhouib. Effet de la connectivité hydrologique sur l'efficience de l'eau des cultures pluviales méditerranéennes modélisation et analyse de scénarios - cas du bassin versant de Kamech, Tunisie. Hydrologie. Montpellier SupAgro, 2023. Français. NNT : 2023NSAM0014 . tel-04368935

HAL Id: tel-04368935

<https://theses.hal.science/tel-04368935>

Submitted on 2 Jan 2024

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.

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR
DE L'INSTITUT AGRO MONTPELLIER
ET DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER**

En Sciences de l'Eau

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau

Portée par

Unité Mixte de Recherche LISAH

**Effet de la connectivité hydrologique sur l'efficience
de l'eau des cultures pluviales méditerranéennes :
modélisation et analyse de scénarios - cas du bassin
versant de Kamech, Tunisie**

Présentée par Mariem DHOUIB

Le 14 juin 2023

Sous la direction de Frédéric JACOB

et co-encadré par Insaf MEKKI, Jérôme MOLENAT, Laurent PREVOT et Rim ZITOUNA-CHEBBI

Devant le jury composé de

Dominique COURAULT, Directrice de recherche, INRAe, UMR EMMAH

Jan DIELS, Professeur, KU Leuven, Soil and Water Management Unit

Aurelie METAY, Professeure, Institut Agro Montpellier, UMR ABSys

Karim BARKAOUI, Chargé de Recherche, CIRAD, UMR ABSys

Rim ZITOUNA-CHEBBI, Maître de Conférences, Université de Carthage, INRGREF

Frédéric JACOB, Directeur de Recherche, IRD, UMR LISAH

Rapporteure

Rapporteur

Présidente du jury

Examineur

Invitée

Directeur de thèse



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**



Avant-Propos

Cette thèse a débuté en novembre 2019 au sein de l'UMR LISAH, sous la direction de Frédéric JACOB et l'encadrement d'Insaf MEKKI, Jérôme MOLENAT, Laurent PREVOT et Rim ZITOUNA-CHEBBI. Ces travaux font partie du projet ALTOS dans le cadre du programme PRIMA et ont été financés par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Tunisien (MESRS) - Tunisie, et par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) - France.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont fait l'objet des publications et communications scientifiques suivantes :

- Publications dans des revues à comité de lecture :

Dhouib, M., Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Molénat, J., Mekki, I., Jacob, F., 2022. Multicriteria evaluation of the AquaCrop crop model in a hilly rainfed Mediterranean agrosystem. *Agricultural Water Management* 273, 107912. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107912>

Dhouib, M., Molénat, J., Prévot, L., Mekki, I., Zitouna-Chebbi, R., Jacob, F., 2023. Quantifying the effect of hydrological connectivity on crop functioning, *Agronomy for Sustainable Development* (In preparation)

- Communications dans des congrès :

Dhouib, M., Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Molénat, J., Mekki, I., Jacob, F., 2022. Multicriteria evaluation of the AquaCrop crop model in a hilly rainfed Mediterranean agrosystem. Oral presentation at the IAHS Scientific Assembly 2022 (Montpellier).

À la mémoire de mon père

Remerciements

L'aboutissement de cette thèse est le point final d'une période de ma vie qui a débuté en 2017 lors de mon inscription en Master à Montpellier, une période longue de 6 années. Cette aventure et ces résultats n'auraient pas été possibles sans la contribution de nombreuses personnes. Je ne pourrais pas citer toutes ces personnes qui, de près comme de loin m'ont aidée, mais ma gratitude leur est à toutes et tous adressée.

C'est grâce à un encadrement adéquat que j'ai pu réaliser cette thèse dans de bonnes conditions et développer mes compétences techniques, scientifiques et relationnelles. C'est pourquoi je remercie particulièrement mon directeur de thèse, Frédéric JACOB pour son humanisme, sa rigueur scientifique ainsi que son accompagnement assidu des heures durant. Ses conseils, notamment en rédaction, m'accompagneront de longues années. J'exprime aussi toute ma gratitude à Laurent PREVOT, pour sa présence quotidienne depuis mon Master. De par son calme et son pragmatisme, il représente une source d'inspiration et un modèle vers lequel tendre. Je remercie également, Jérôme MOLENAT qui a intégré en cours de route l'encadrement de ma thèse et dont l'aide m'a été précieuse. Je salue en particulier la qualité de ses conseils en hydrologie, son professionnalisme ainsi que sa réactivité et son efficacité. J'ai une pensée particulière pour Rim ZITOUNA-CHEBBI et Insaf MEKKI pour leur aide qui m'a permis d'accéder aux données nécessaires à mes travaux ainsi que pour leurs présences lors de mes séjours en Tunisie. Grâce à leurs relais, j'ai pu aller sur le terrain et mettre des images sur un travail abstrait de modélisation. Ces visites sur site n'auraient pas été aussi constructives sans la qualité des équipes techniques que je remercie sincèrement de leur accueil et du temps qu'elles m'ont accordé.

Je remercie également l'ensemble des membres de mon comité de suivi pour avoir pris le temps d'échanger sur mes travaux, et dont les conseils m'ont été précieux. J'adresse aussi mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury de thèse et plus particulièrement à mes deux rapporteurs, Dominique COURAULT et Jan DIELS, pour avoir pris le temps d'évaluer mon travail.

Enfin j'aimerais exprimer toute ma gratitude à tout le personnel de l'UMR LISAH. J'ai une pensée particulière pour Jean-Stéphane BAILLY, directeur de l'UMR et ancien responsable de master, grâce à qui le projet de thèse a pu se concrétiser. Je remercie également Guillaume

COULOUMA, pour ces conseils avisés en pédologie. Il est reconnu que les démarches administratives peuvent représenter une charge mentale importante en fonction de nos situations et de nos pays. Au vu de ma situation, je remercie d'autant plus chaleureusement Nadia pour son aide. Grâce à elle, j'ai pu me concentrer pleinement sur mes travaux de recherche.

Un grand merci également à tous les collègues doctorants, Evaelle, Léa, Guillaume, Martin, Meriem et Pauline avec qui nous partageons la même aventure qu'est une thèse. Une pensée particulière à Pauline et Meriem : le bureau qu'elles partageaient était un endroit où je pouvais rire, râler, mettre des mots sur ce que je ressentais et les partager avec elles. Elles m'ont beaucoup écoutée, conseillé et elles ont montré une bienveillance exceptionnelle à mon égard. « Pauline, me voilà enfin arrivée à la fin de cette aventure et j'attends avec impatience de valider ton hypothèse du "bonheur absolu" ». « Meriem, mes valises sont déjà prêtes pour venir te rendre visite juste après la soutenance. » Guillaume, qui nous a rejoint en cours de route, a égaillé nos pauses et a été un interlocuteur privilégié pour discuter de ce travail de thèse.

En arrivant en France, j'étais seule, sans famille pour me soutenir mais grâce à l'accueil que m'ont réservé certains héros ordinaires, je peux dire que j'ai une seconde famille ici. Ils ont été présents pour moi quand j'en avais besoin, ont porté avec moi les responsabilités qui m'écrasaient et m'ont encouragé de tout leur cœur. Ainsi je rends hommage à Bruce, Charles, Hayem, Leila, Maria, Marine et Sébastien. Je remercie également tous ceux qui ont pris de mes nouvelles et qui m'ont soutenue d'une manière ou d'une autre.

Je remercie spécialement ma famille, ma mère, ma sœur et mes frères, qui ont toujours cru en moi, et m'ont aidée à arriver là où j'en suis aujourd'hui. Malgré la distance, ma famille n'a cessé de prendre de mes nouvelles et de m'encourager. Au milieu de cette aventure, j'ai eu l'honneur de rejoindre une nouvelle famille en me mariant et je la remercie pour ce soutien supplémentaire. Enfin je remercie mon mari : c'est grâce à sa présence et à son soutien indéfectible que j'ai réussi à aller au bout de cette thèse.

Résumé

L'organisation spatiale des cultures au sein des paysages agricoles paraît être une voie prometteuse pour assurer la durabilité des agrosystèmes pluviaux méditerranéens. L'exploration du rôle de cette organisation spatiale implique une meilleure compréhension des relations entre cycle de l'eau et cycle de la végétation, qui interagissent notamment par la distribution des eaux de ruissellement au sein du bassin versant, via la connectivité hydrologique inter-parcellaire. L'effet de cette connectivité sur la production agricole ayant très peu été étudié jusqu'à présent, cette thèse vise à évaluer l'effet de la connectivité hydrologique inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures. Pour ce faire, nous avons conduit une expérimentation numérique, basée sur l'utilisation du modèle de culture AquaCrop.

Nous avons tout d'abord vérifié la capacité du modèle AquaCrop à simuler le fonctionnement des agrosystèmes pluviaux méditerranéens en relief collinaire. Pour ce faire, nous avons conduit une évaluation multicritère d'AquaCrop, en considérant différentes combinaisons de cultures et de sols, sous des conditions climatiques contrastées. La comparaison avec un ensemble de données collectées au nord-est de la Tunisie (Cap Bon, bassin versant de Kamech - observatoire OMERE) a montré qu'AquaCrop simule correctement un ensemble de variables agro-hydrologiques (biomasse, taux de couverture, évapotranspiration, contenu en eau du sol et ruissellement) pour toutes les combinaisons de cultures et de sols étudiées, et pour toutes les années climatiques.

L'effet de la connectivité hydrologique inter-parcellaire sur la production agricole a été étudié via une expérimentation numérique impliquant deux parcelles d'aires variables. Cette expérimentation combinait trois textures de sol, trois profondeurs de sol, deux cultures et trois aires de la parcelle amont, sur 25 années climatiques. Elle a permis de hiérarchiser les facteurs influençant le fonctionnement de la végétation cultivée. Si la production agricole reste principalement contrôlée par les conditions environnementales (climat et sol), l'apport d'eau par la connectivité a un effet positif sur la production agricole dans un nombre important de situations, entre 20% et 35% selon les cultures. Cet effet positif est majoritairement rencontré en conditions climatiques semi-arides et sub-humides sèche, avec un fort effet de la répartition intra-annuelle des pluies pour ces dernières.

Cette étude est une première étape dans l'étude de l'effet de la connectivité hydrologique sur le fonctionnement des cultures. Il sera nécessaire d'approfondir ces résultats par la prise en compte des flux d'eau sub-surfaciques, et l'extension à des conditions climatiques futures.

Mots clés : Méditerranée, agrosystèmes pluviaux, reliefs collinaires, connectivité hydrologique, AquaCrop, modélisation agro-hydrologique

Abstract

Spatial organization of crops within agricultural landscapes appears to be a promising way to ensure the sustainability of Mediterranean rainfed agrosystems. Exploring the role of this spatial organization implies a better understanding of the relationships between the water cycle and the vegetation cycle, which interact notably through the distribution of runoff within the watershed, via inter-plot hydrological connectivity. The effect of this connectivity on agricultural production having been little studied until now, this thesis aims at evaluating the effect of inter-plot hydrological connectivity on crop functioning. To do so, we conducted a numerical experiment, based on the use of the AquaCrop crop model.

We first verified the ability of the AquaCrop model to simulate the functioning of Mediterranean rain-fed agrosystems in hilly terrains. Thus, a multi-criteria evaluation of AquaCrop was conducted, considering different combinations of crops and soils, under contrasted climatic conditions. The comparison with a dataset collected in the North-East of Tunisia (Cap Bon, Kamech watershed - OMERE observatory) showed that AquaCrop correctly simulates a set of agro-hydrological variables (biomass, canopy cover, evapotranspiration, soil water content and runoff) for all the studied crop and soil combinations, and for all climatic years.

The effect of inter-plot hydrological connectivity on crop production was studied via a numerical experiment involving two plots of varying area. This experiment combined three soil textures, three soil depths, two crops, and three upstream plot areas, over 25 climate years. It allowed the prioritization of the factors influencing the functioning of the cultivated vegetation. While crop production is mainly controlled by environmental conditions (climate and soil), water supply through connectivity has a positive effect on crop production in a significant number of situations, between 20% and 35% depending on the crop. This positive effect is mostly found in semi-arid and dry sub-humid climatic conditions, with a strong effect of the intra-annual rainfall distribution for the latter.

This study is a first step in quantifying the effect of hydrological connectivity on crop functioning. It might be necessary to deepen these results by account for sub-surface water flows, and by extending them to future climatic conditions.

Keywords: Mediterranean, rainfed agrosystems, hilly terrains, hydrological connectivity, AquaCrop, agro-hydrological modelling

Table des matières

Avant-Propos	3
Remerciements	7
Résumé	9
Abstract	11
LISTE DES FIGURES	17
LISTE DES TABLEAUX	23
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	27
Introduction générale	31
Chapitre 1 : Enjeux, état de l'art et questions scientifiques	35
1. L'agriculture pluviale méditerranéenne : caractéristiques et pressions.....	36
1.1. Principales caractéristiques.....	36
1.1.1. Caractéristiques économiques.....	37
1.1.2. Caractéristiques sociales.....	37
1.1.3. Caractéristiques sociotechniques.....	37
1.2. Pressions.....	38
1.2.1. Expansion démographique.....	39
1.2.2. Surexploitation des ressources et mauvaises pratiques.....	39
1.2.3. Politiques de gestion.....	40
1.2.4. Forçage climatique.....	40
1.3. Enjeux et perspectives de l'agriculture méditerranéenne pluviale.....	41
2. Importance du relief collinaire en Méditerranée.....	41
3. Bassin versant : siège de nombreux processus biophysiques indispensables à la gestion durable de l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire.....	44
3.1. Caractéristiques générales du sol et de l'atmosphère.....	45
3.1.1. Le sol.....	45
3.1.2. L'atmosphère.....	47
3.2. Cycle de culture.....	47
3.2.1. Interactions sol-plante.....	47
3.2.2. Interactions atmosphère-plante.....	48
3.2.3. Différentes phases du cycle de développement de la culture.....	50
3.3. Cycle de l'eau.....	50
3.3.1. Composantes du cycle de l'eau.....	50
3.3.2. Échelle spatio-temporelle des processus hydrologiques.....	57
3.3.3. Relations entre cycle de l'eau et cycle de végétation.....	58
4. Leviers d'action pour gérer durablement l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire.....	60
4.1. Actions de nature agronomique.....	61
5. Efficience agronomique de l'eau : une métrique de gestion de l'eau agricole.....	67
5.1. Définition.....	67
5.2. Facteurs d'influence.....	68
5.2.1. Nature de la culture.....	68
5.2.2. Le climat et la quantité d'eau appliquée au système.....	69
5.2.3. Les conditions édaphiques.....	70
5.2.4. Les pratiques culturelles.....	70
6. Expérimentation ou modélisation : quels outils d'aide à la gestion de l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire ?.....	71
6.1. Approches basées sur l'expérimentation.....	71
6.2. Approches basées sur la modélisation numérique.....	73

7.	Modélisation agro-hydrologique, outil d'aide à la gestion de l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire	75
7.1.	Modèles de culture	75
7.2.	Modèles hydrologiques	78
7.3.	Couplage modèles de culture – modèles hydrologique : modèles agro-hydrologiques	81
7.4.	Méthodes de couplage et modèles agro-hydrologiques existants	82
8.	Objectifs et questions scientifiques	85
Chapitre 2 : Stratégie méthodologique		87
1.	Quantification de l'impact de la connectivité hydrologique sur le fonctionnement des cultures	88
2.	Choix du modèle de culture	90
2.1.	Critères de choix	90
2.2.	Sélection et présentations des modèles de culture	91
2.3.	Comparaison des modèles	96
2.3.1.	Variables à simuler par le modèle	96
2.3.2.	Forçage climatiques et types de stress	98
2.3.3.	Cultures et conditions environnementales	99
2.3.4.	Complexité et caractéristiques techniques	100
3.	Présentation d'AquaCrop	102
4.	Site d'étude et données existantes	108
4.1.	Site d'étude	108
4.1.1.	Critères de choix du site d'étude	108
4.1.2.	Présentation générale du bassin de Kamech	109
4.2.	Base de données existante	112
4.2.1.	Données climatiques et micro-météorologiques	113
4.2.2.	Données de végétation	115
4.2.3.	Données pédologiques	117
4.2.4.	Données hydrologiques	117
4.3.	Caractéristiques du site d'étude	118
4.3.1.	Dynamiques spatio-temporelle d'occupation du sol	119
4.3.2.	Fentes de retrait et ruissellement	121
Chapitre 3 : Évaluation multicritère du modèle de culture AquaCrop dans un agrosystème méditerranéen pluvial collinaire		123
Résumé étendu de l'article		124
1.	Introduction	129
2.	Presentation of the AquaCrop model	132
3.	Materials and methods	133
3.1.	Study site	133
3.2.	Datasets	134
3.2.1.	AquaCrop input data	136
3.2.1.1.	Climatic data	136
3.2.1.2.	Soil hydrodynamic parameters	136
3.2.1.3.	Crop parameters	140
3.2.2.	AquaCrop multicriteria assessment	140
3.2.2.1.	Actual evapotranspiration (ET _a)	140
3.2.2.2.	Crop variables (CC, AGB)	141
3.2.2.3.	Soil water content (SWC)	142
3.2.2.4.	Runoff (R)	143
3.3.	Determination of initial soil moisture and fertilization degree	143
3.4.	Model evaluation	144
4.	Results	145
4.1.	Canopy cover (CC)	145
4.2.	Aboveground biomass (AGB)	148
4.3.	Actual evapotranspiration (ET _a)	150

4.4.	Runoff (R)	152
4.5.	Soil water content (SWC).....	154
5.	Discussion.....	157
5.1.	Canopy cover (CC).....	157
5.2.	Aboveground Biomass (AGB)	158
5.3.	Actual evapotranspiration (ET _a).....	158
5.4.	Runoff (R)	159
5.5.	Soil water content (SWC).....	159
5.6.	Analysis by crop type and soil class.....	160
5.7.	Main outcomes	161
6.	Conclusion	161
Chapitre 4 : Connectivité hydrologique : quel effet sur le fonctionnement des cultures ? 163		
1.	Introduction.....	163
2.	Matériels et méthodes	165
2.1.	Démarche générale	165
2.2.	Expérimentation numérique	169
2.2.1.	Facteurs à prendre en compte	169
2.2.1.1.	Variables de forçage climatique.....	169
2.2.1.2.	Facteurs pédologiques.....	172
2.2.1.3.	Paramètres de cultures et choix des dates de semis	173
2.2.1.4.	Aire contributive amont	174
2.2.2.	Plan de simulation numérique.....	175
2.2.3.	Analyse des simulations	178
3.	Résultats.....	183
3.1.	Analyse du ruissellement amont.....	183
3.1.1.	Variation en fonction du temps.....	183
3.1.2.	Analyse de sensibilité	184
3.1.3.	Classification du ruissellement amont	186
3.2.	Analyse des simulations de la parcelle aval (Av).....	187
3.2.1.	Analyse de sensibilité	188
3.2.1.1.	Indicateurs de fonctionnement hydrologique.....	188
3.2.1.2.	Variables de production agricole	191
3.2.1.3.	Indicateurs de fonctionnement agronomique	193
3.2.2.	Effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures	196
4.	Discussion.....	203
4.1.	Effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures	203
4.1.1.	Effet positif de la connectivité.....	203
4.1.2.	Effet négatif de la connectivité	213
4.2.	Analyse de sensibilité	217
5.	Conclusion	219
Conclusion générale et perspectives		221
Annexes		229
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		245

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Démarche générale de la thèse.....	34
Figure 1.1 : Pourcentage des terres cultivées en pluvial dans différentes régions (Wani et al., 2009).....	36
Figure 1.2 : Récapitulatif des pressions exercées sur l'agriculture pluviale méditerranéenne (Daccache et al., 2016).	38
Figure 1.3 : Évolution démographique de la population méditerranéenne (Léger and Parant, 2021).....	39
Figure 1.4 : Carte d'altitude du pourtour méditerranéen (https://fr-fr.topographic-map.com/). L'altitude d'un relief collinaire ne dépasse généralement pas 600 m d'altitude.	42
Figure 1.5 : Principales composantes du cycle de l'eau (Leenhardt et al., 2020).	51
Figure 1.6 : Échelle spatio-temporelle des processus hydrologiques (Blöschl and Sivapalan, 1995).....	57
Figure 1.7 : Relations entre cycle de l'eau et cycle de la végétation.	58
Figure 1.8 : Différentes échelles spatiales de gestion du système agricole.	61
Figure 1.9 : Technique de conservation des eaux et des sols, exemple des demi-lunes à gauche et de zaïs à droite.	66
Figure 1.10 : Étapes d'évolution des modèles de culture (Keating et Thorburn, 2018)	76
Figure 2.1 : Graphique de synthèse de la démarche générale de la thèse.	90
Figure 2.2 : Schéma représentatif du fonctionnement d'AquaCrop (manuel d'utilisation d'AquaCrop).....	102
Figure 2.3 : Schéma représentatif du sol dans AquaCrop. Dans cette représentation, le sol est discrétisé en 12 compartiments répartis sur deux horizons, de profondeurs différentes.....	103
Figure 2.4 : Évolution temporelle du taux de couverture végétale (CC) (Manuel d'utilisation d'AquaCrop). CC0 et CCx représentent le taux de couverture initial et le taux de couverture maximal, respectivement. CGC et CDC représentent le coefficient de croissance végétale et le coefficient du déclin du couvert végétal, respectivement.	104
Figure 2.5 : Étapes de calcul du bilan hydrique dans chaque compartiment <i>i</i> du sol.	106
Figure 2.6 : Localisation de Kamech au sein du bassin versant de Lebna.....	109
Figure 2.7 : Kamech en quelques photos. (A) Vue panoramique de Kamech. (B) Retenue collinaire, située à l'exutoire du bassin versant. (C) Différents types de parcours existant à Kamech (parcours ligneux et parcours herbacés à base de végétation annuelle.....	111
Figure 2.8 : Localisation des différents instruments hydrométéorologiques au sein du bassin versant de Kamech (Molénat et al., 2018).	112
Figure 2.9 : Évolution temporelle des pluies (P, mm), de la température de l'air (T, °C) et de l'évapotranspiration de référence (ET0, mm) mensuelles moyennes sur 25 ans, entre 1994 et 2019.....	113
Figure 2.10 : Protocole de prise des photos hémisphériques (Boukari, 2017).....	115
Figure 2.11 : Cycles phénologiques des cultures étudiées. La figure A représente les différents stades tels qu'ils sont représentés dans AquaCrop, en fonction du taux de couverture végétale (CC). La figure B représente la durée des différents stades pour chaque culture, exprimés en degré-jour (GDD). Sm, L, DF, Sn et MF désignent le semis, la levée, le début de floraison, la sénescence et la maturation physiologique, respectivement.	117

Figure 2.12 : Dispositif emboîté de stations hydrologiques sur Kamech (Hamdi et al., 2010)	118
Figure 2.13 : Évolution interannuelle des proportions relatives des superficies dédiées à chaque culture à Kamech entre les années hydrologiques 2001 et 2012.	119
Figure 2.14 : Pourcentage de répartition de classes de rotation culturales entre 1997-2002.	120
Figure 2.15 : Fente de retrait, observée à Kamech le 15 avril 2021.	121
Figure 3.1 : Map of the Kamech catchment with the location of the plots A, B, D, P5, P6, P7, P8 and P9. The meteorological station is located near the outlet of the catchment area, downstream limit of the hilly lake.	135
Figure 3.2 : Time series of soil moisture data (dotted lines) for each of the eight plots. The horizontal lines indicate the soil moisture at wilting point (HWP) and soil moisture at field capacity (HFC) estimates from the laboratory measurements (Lab) (red lines) and agroclimatic method (AC) (blue lines) methods. The vertical lines indicate the harvest dates.	139
Figure 3.3 : Comparison between simulated and observed canopy cover (CC) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	146
Figure 3.4 : Comparison between simulated and observed canopy cover (CC) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	147
Figure 3.5 : Comparison between simulated and observed aboveground biomass (AGB) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	148
Figure 3.6 : Comparison between simulated and observed aboveground biomass (AGB) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	150
Figure 3.7 : Comparison between simulated and observed actual evapotranspiration (ETa) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type. A, B relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	151
Figure 3.8 : Comparison between simulated and observed runoff (R) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	152
Figure 3.9 : Comparison between simulated and observed runoff (R) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years.	

The black line corresponds to the regression line and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.....	154
Figure 3.10 : Comparison between simulated and observed soil water content (SWC) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	155
Figure 3.11 : Comparison between simulated and observed soil water content (SWC) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.	156
Figure 4.1 : Schéma représentatif de la disposition spatiale des deux parcelles amont (Am) et aval (Av) connectées avec le flux de ruissellement en provenance de l'amont ainsi que les différents facteurs croisés pour chaque parcelle. Le détail des différentes valeurs de chaque facteur d'influence est donné dans la section 2.2. Ce schéma représente le plan d'expérimentation numérique pour une seule culture en aval, et il sera reproduit pour chaque culture choisie à l'aval.....	166
Figure 4.2. : Cumuls annuels de pluie (1ère ligne), température annuelle moyenne (2ème ligne) et d'évapotranspiration de référence (ET0) (3ème ligne). Les températures moyennes annuelles sont calculées entre le mois d'octobre et le mois de juin, période correspondante au cycle de culture dans la région. La ligne noire continue est la moyenne des variables sur les 25 ans et les lignes rouges discontinues sont les maxima et minima des cumuls sur les 25 ans.	170
Figure 4.3. : Variabilité temporelle des cumuls mensuels de pluie, sur 25 années, entre 1995 et 2019. Cum p (courbe noire) représente les cumuls mensuels observés à l'année X, moy p (courbe verte) représente les cumuls mensuels moyens sur la période étudiée, max p (courbe bleue) représente les cumuls mensuels maximums observés en 25 ans et min p (courbe rouge) représente les cumuls mensuels minimums observés en 25 ans (année hydrologique de septembre année [n-1] à août [n]).	171
Figure 4.4 : Classification des années climatiques selon l'indice d'aridité de la FAO (AIF).	172
Figure 4.5 : Différentes configurations impluvium amont (Am) - parcelle aval (Av).....	174
Figure 4.6 : Différentes étapes du plan d'expérience numérique réalisé dans le présent travail de thèse. L'étape 1 n'apparaît pas dans la figure car elle consiste à fixer les différentes valeurs de chaque facteur d'influence. AGB(t), Yld(t), R(t) et P(t) correspondent aux chroniques de biomasse aérienne sèche, du rendement, du ruissellement amont et de la pluviométrie, respectivement, sur 25 années. Am et Av correspondent à la parcelle amont et la parcelle aval, respectivement. T et Pr correspondent à la texture et à la profondeur du sol, respectivement. La culture X signifie fève ou blé. En sus de la pluviométrie, le fichier climat contient des données de température de l'air, d'évapotranspiration de référence et de concentration en CO ₂ atmosphérique.	176
Figure 4.7 : Variation du cumul de ruissellement mensuel simulé (R) au niveau de la parcelle Am, pour toutes les combinaisons de culture/texture/profondeur du sol, sur 25 années.	184
Figure 4.8 : Ruissellement annuel (R), simulé au niveau de la parcelle Am, sur 25 années, en fonction du climat, de la texture et de la profondeur du sol, et ce pour le blé (boxplots jaunes) et pour la fève (boxplots verts). SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides,	

subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF (Section 2.1). C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. 185

Figure 4.9 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour le cumul annuel de ruissellement (R), simulé au niveau de la parcelle Am, sur 25 années..... 186

Figure 4.10 : Coefficient de ruissellement annuel (RC, 1ère ligne) et coefficient de percolation annuel (DPC, 2ème ligne) pour la parcelle Av, pour le blé (jaune) et la fève (vert), en fonction des quatre facteurs considérés. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4 du ruissellement amont, respectivement. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les étoiles correspondent à la significativité du p-value issue d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Signification des codes : "****" : p-value $\in [0 - 0.001[$, "***" : p-value $\in [0.001 - 0.01[$, "**" : p-value $\in [0.01 - 0.05[$, "." : p-value $\in [0.05 - 0.1[$, "NS" : p-value $\in [0.1 - 1]$ 188

Figure 4.11 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour le coefficient de ruissellement (RC, colonne de gauche) et le coefficient de percolation (DPC, colonne de droite), et ce pour les deux cultures blé (ligne du haut) et fève (ligne du bas). R amont représente le ruissellement amont..... 190

Figure 4.12 : Biomasse aérienne sèche annuelle (AGB, 1ère ligne) et rendement annuel (Yld, 2ème ligne) de la parcelle Av, pour le blé (jaune) et la fève (vert), en fonction des quatre facteurs considérés. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement du ruissellement amont. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les étoiles correspondent à la significativité du p-value issue d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Signification des codes : "****" : p-value $\in [0 - 0.001[$, "***" : p-value $\in [0.001 - 0.01[$, "**" : p-value $\in [0.01 - 0.05[$, "." : p-value $\in [0.05 - 0.1[$, "NS" : p-value $\in [0.1 - 1]$ 192

Figure 4.13 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour la biomasse aérienne sèche (AGB, colonne de gauche) et le rendement (Yld, colonne de droite), et ce pour le blé (première ligne) et la fève (deuxième ligne). R amont représente le ruissellement amont. 193

Figure 4.14 : Valeur annuelle de l'efficacité agronomique de l'eau, calculée à partir de la biomasse (WUEAGB, 1ère ligne) et du rendement (WUEYld, 2ème ligne) pour la parcelle Av, pour le blé (jaune) et la fève (vert), en fonction des quatre facteurs considérés. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement du ruissellement amont. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les étoiles correspondent à la significativité du p-value issue d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Signification des codes : "****" : p-value $\in [0 - 0.001[$, "***" : p-value $\in [0.001 - 0.01[$, "**" : p-value $\in [0.01 - 0.05[$, "." : p-value $\in [0.05 - 0.1[$, "NS" : p-value $\in [0.1 - 1]$ 195

Figure 4.15 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour l'efficacité agronomique de l'eau calculée à partir de la biomasse aérienne sèche (WUEAGB, colonne de

gauche) et à partir du rendement (WUEYld, colonne de droite), et ce pour les deux cultures blé (ligne du haut) et fève (ligne du bas). R amont représente le ruissellement amont.	196
Figure 4.16 : Biomasse aérienne sèche (AGB) pour le blé sur 25 années de simulation, sans connectivité (SC, courbe rouge) et avec connectivité (AC, courbes noires). Chaque ligne correspond à une combinaison de texture et de profondeur du sol pour la parcelle Av. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement.....	198
Figure 4.17 : Biomasse aérienne sèche (AGB) pour la fève sur 25 années de simulation, sans connectivité (SC, courbe rouge) et avec connectivité (AC, courbes noires). Chaque ligne correspond à une combinaison de texture et de profondeur du sol pour la parcelle Av. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement.....	199
Figure 4.18 : Coefficient de stress hydrique (Ks) moyen, calculé pour la fève (points triangulaires verts) et pour le blé (points ronds jaunes) en cas de simulations sans connectivité. Dans cette figure, un Ks égale à 1 correspond à l'absence de stress hydrique, tandis qu'un Ks égale à 0 correspond un stress total. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement. Les années pour lesquelles il n'y a pas de valeurs de Ks, correspondent à des années pour lesquelles la végétation n'a pas poussé.	205
Figure 4.19 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) positifs, sur les 12 150 échantillons, supérieurs au seuil de significativité (0.11), pour la biomasse aérienne sèche, en considérant (1) chaque année sur 25 ans, (2) chaque combinaison texture/profondeur du sol, et (3) chaque culture. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs de sol de 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement. Les couleurs des différentes colonnes représentent la classification des années climatiques : vert pour une année subhumide, jaune pour une année subhumide sèche et orange pour une année semi-aride. Le pourcentage au sein des cellules blanches correspond à la moyenne des pourcentages pour l'année en question (moyenne sur la colonne).....	206
Figure 4.20 : Comparaison de l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC) et du taux de couvert végétale (CC), pour un blé semé sur un sol argileux limoneux de 1.5 de profondeur, entre simulations sans et avec connectivité (SC et AC, respectivement), et ce pour les années 2016 et 2018. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent et l'humidité du sol à la capacité au champ, respectivement. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.	208
Figure 4.21 : Comparaison de la production de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yield) du blé, semé sur un sol argileux limoneux de 1.5 de profondeur, entre simulations sans et avec connectivité (SC et AC, respectivement), et ce pour les années 2002, 2016 et 2018.	209
Figure 4.22 : Comparaison de l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC) et du taux de couverture végétale (CC) simulées sans connectivité (SC), en 2004 et 2010 avec celles des années 2003, 2005 et 2009, pour la fève, semée sur un sol argileux limoneux de 1 m de profondeur. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent et l'humidité du sol à la capacité au champ, respectivement. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.	211

Figure 4.23 : Comparaison des cumuls mensuels de pluie observés en 2000 (rouge), 2003 (bleu) et 2016 (vert)..... 212

Figure 4.24 : Comparaison des évolutions temporelles de l’humidité du sol (SWC), sans connectivité, en 2000 (courbe rouge), 2003 (courbe bleue) et 2016 (courbe verte), pour le blé semé sur un sol de profondeur 1.5 m (trois textures considérées). C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. PWP et FC correspondent à l’humidité du sol au point de flétrissement permanent et l’humidité du sol à la capacité au champ, respectivement. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l’humidité du sol à la moitié du réservoir utile. 213

Figure 4.25 : Évolution temporelle de la profondeur racinaire (première ligne), de l’humidité du sol (deuxième ligne) et de la transpiration végétale (troisième ligne) pour la fève, cultivée en 2015, sur un sol argileux d’une profondeur de 1.5 m (C_1.5). La courbe rouge correspond à la simulation sans connectivité (SC). La courbe noire correspond à la simulation avec connectivité (AC). SWC correspond à l’humidité du sol, et Tr correspond à la transpiration. Les lignes verticales correspondent aux dates auxquelles un décrochage entre les courbes sans et avec connectivité est observé au niveau de la transpiration. 215

Figure 4.26 : Évolution temporelle de l’humidité du sol de chaque horizon de sol, pour la fève, cultivée en 2015, sur un sol argileux d’une profondeur de 1.5 m (C_1.5). X0.065 m, X0.195 m, X0.325 m, X0.455 m, X0.585 m, X0.715 m et X0.845 m correspondent aux horizons 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 du sol. La courbe rouge correspond à la simulation sans connectivité (SC). La courbe noire correspond à la simulation avec connectivité (AC). Les lignes verticales correspondent aux dates auxquelles un décrochage entre les courbes sans et avec connectivité est observé au niveau de la transpiration. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs de PWP et FC. 216

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Récapitulatif des différentes expressions de l'efficacité de l'eau (WUE)	68
Tableau 1.2 : Quelques exemples de modèles hydrologiques ainsi que leur classification....	79
Tableau 2.1 : Caractéristiques générales des modèles de cultures sélectionnés.	95
Tableau 2.2 : Variables simulées par les modèles envisagés. Les variables agronomiques sont l'indice foliaire (LAI), le taux de couverture végétale (CC), la biomasse (AGB) et le rendement (Yld). Les variables hydrologiques sont la transpiration (Tr), l'évaporation du sol (Es), l'infiltration (Infl), le ruissellement (R), la percolation (DP). SWC représente l'humidité du sol.	97
Tableau 2.3 : Variables de forçage climatiques et types de stress considérés. P, Tmp et ET0 désignent la pluie, la température de l'air et l'évapotranspiration de référence, respectivement. H désigne le stress hydrique et T désigne le stress thermique.	98
Tableau 2.4 : Panel de cultures méditerranéennes non simulées par les modèles de cultures retenus et utilisation en région méditerranéenne.....	100
Tableau 2.5 : Complexité et caractéristiques techniques.....	100
Table 3.1 : The nine available datasets for the multicriteria evaluation of AquaCrop. LAI_plan, CC_visu, ETa, R and SWC stand for LAI from planimetric measurements, canopy cover from visual quantification, actual evapotranspiration, runoff and soil water content, respectively. The value Y of the label Year is related to harvesting year, and thus corresponds the crop cycle that spreads from September of year Y-1 to August of year Y.....	135
Table 3.2 : Soil characteristics of the plots. Soil classes are taken from Mekki et al. (2006). We used the same values of soil depth for plots A, B and D thanks to their spatial proximity. ..	136
Table 3.3 : Comparison between soil moisture at wilting point (HWP) and soil moisture at field capacity (HFC) estimates by the laboratory measurements (Lab) and the agroclimatic method (AC) methods.	138
Table 3.4 : Number of plots and hemispherical photos available for each crop, to be used for determining the value of coefficient k in Equation 3.2.	141
Table 3.5 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for canopy cover (CC) on a crop type basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.....	146
Table 3.6 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for canopy cover (CC) on a soil class basis. n is the observation number. R ² is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.....	148
Table 3.7 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for aboveground biomass (AGB) on a crop type basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.....	149
Table 3.8 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for aboveground biomass (AGB) on a soil class basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.....	150

Table 3.9 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for actual evapotranspiration (ETa) on a crop type basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4..... 151

Table 3.10 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for runoff (R) on a crop type basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4. 153

Table 3.11 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for runoff (R) on a soil class basis. n is the observation number. R² is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p values of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4. 154

Table 3.12 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for soil water content (SWC) on a crop type basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p values of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4..... 156

Table 3.13 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for soil water content (SWC) on a soil class basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p values of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4..... 157

Tableau 4.1 : Propriétés hydrodynamiques du sol. C, CL et SCL correspondent au Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. PWP, FC, Sat et Ksat correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent, l'humidité du sol à la capacité au champ, l'humidité du sol à saturation et la conductivité hydraulique à saturation, respectivement. 173

Tableau 4.2 : Récapitulatif des différentes valeurs pour les facteurs d'influence considérées dans chaque étape de simulation. C, CL et SCL correspondent au Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Am et Av correspondent à la parcelle amont et à la parcelle aval, respectivement. R correspond au ruissellement amont. Cu, P et Tr correspondent à la culture, de la texture et à la profondeur du sol, respectivement. α correspond au rapport entre l'aire contributive amont et l'aire de la parcelle aval. 177

Tableau 4.3 : Récapitulatif des différentes variables et indicateurs d'analyse. RC et DPC désignent le coefficient de ruissellement aval et le coefficient de percolation, respectivement. AGB et Yld désignent la biomasse aérienne sèche et le rendement, respectivement. WUEAGB et WUEYld désignent l'efficacité agronomique de l'eau calculée à partir de la biomasse aérienne sèche et du rendement, respectivement. Av représente la parcelle aval. Les variables et indicateurs d'analyse sont des grandeurs annuelles. 180

Tableau 4.4 : Tableau explicatif du raisonnement de l'analyse des valeurs des écarts relatifs Δ , calculés entre les variables sans (Yld_{SC}) et avec (Yld_{AC}) connectivité. 182

Tableau 4.5 : Statistique de variation du cumul annuel du ruissellement amont (R) en considérant les différentes tailles de l'aire contributive amont. Q1, Q2 et Q3 représentent les valeurs pour le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile, respectivement. Nous indiquons aussi la moyenne du ruissellement annuel amont (cases grisées). Pour chaque valeur de ruissellement, nous indiquons le coefficient du ruissellement (RC) correspondant (rapport ruissellement / précipitation pour l'échantillon concerné), sauf pour la moyenne qui est le ratio ruissellement moyen sur les 162 échantillons / précipitation moyenne sur toute la période d'étude..... 186

Tableau 4.6 : Classification du ruissellement amont. C1, C2, C3, et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement du ruissellement amont. Q1, Q2 et Q3 correspondent au 1er quartile, à la médiane et au 3ème quartile, respectivement.....	187
Tableau 4.7 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) positifs, sur les 12 150 échantillons, supérieurs au seuil de significativité (0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) pour le blé sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.	200
Tableau 4.8 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) positifs, sur les 12 150 échantillons, supérieurs au seuil de significativité (0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) pour la fève sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.	200
Tableau 4.9 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) négatifs, sur les 12 150 échantillons, inférieurs au seuil de significativité (-0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) pour le blé sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.	201
Tableau 4.10 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) négatifs, sur les 12 150 échantillons, inférieurs au seuil de significativité (-0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) pour la fève sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.....	201

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Δ	: pente de la courbe entre la température de l'air et la pression de vapeur à saturation
AGB	: biomasse aérienne sèche
AI	: indice d'aridité
AIF	: indice d'aridité de la FAO
AIM	: indice de Martonne
Am	: parcelle Am
ANOVA	: analyse de variance
Av	: parcelle aval
C	: sol argileux
C1	: classe 1 du ruissellement amont
C2	: classe 2 du ruissellement amont
C3	: classe 3 du ruissellement amont
C4	: classe 4 du ruissellement amont
CC	: taux de couverture végétale
CC*	: taux de couverture végétale ajusté pour les effets micro-advectifs.
CC₀	: taux de couverture végétale initial
CC_x	: taux de couverture végétale maximale
CDC	: le coefficient du déclin du couvert végétal
CGC	: coefficient de croissance végétale
CL	: sol argileux limoneux
CN	: curve number
CO₂	: dioxyde de carbone
C_p	: la chaleur spécifique de l'air
CR	: remontées capillaires
DF	: début de floraison
DP	: percolation
DPC	: coefficient de percolation
Es	: évaporation du sol
ET	: évapotranspiration
ET₀	: évapotranspiration de référence
ET_a	: évapotranspiration réelle

ETM	: l'évapotranspiration maximale
G	: flux de chaleur dans le sol
GDD	: degré-jour
H	: flux de chaleur sensible
HFC	: soil moisture at field capacity
HI	: indice de récolte
HSAT	: soil moisture at saturation
HWP	: soil moisture at wilting point
I_a	: quantité d'eau qui peut s'infiltrer avant que le ruissellement ne se produise
Infl	: infiltration
Kc	: coefficient cultural
K_{Tr,x}	: coefficient de transpiration maximal
Ke_x	: coefficient d'évaporation maximale
Kr	: coefficient de réduction de l'évaporation
Ks	: coefficient de stress
Ksat	: conductivité hydraulique à saturation
K_{STr}	: coefficient de stress de froid
L	: levée
LAI	: indice de surface foliaire
LE	: flux de chaleur latente
MF	: maturité physiologique
OMERE	Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau
P	: pluviométrie
PWP	: humidité du sol au point de flétrissement permanent
R	: ruissellement
r_a	: résistance aérodynamique
RC	: coefficient de ruissellement
Rg	: rayonnement global
Rn	: rayonnement net
r_s	: résistance de surface
S	: potentiel maximum de rétention d'eau dans le sol
SA	: année semi-aride
Sat	: humidité du sol à saturation
SCL	: sol sableux argileux limoneux
SH	: année subhumide

SHS	: année subhumide sèche
SI	: indice de sensibilité
Sm	: semis
SWC	: humidité du sol
sWUE	: efficacité agronomique de l'eau du système
Ta	: température de l'air
Tr	: transpiration végétale
WP	: productivité de l'eau
WP*	: productivité de l'eau normalisée pour prendre en compte la concentration en CO ₂ atmosphérique
WUE	: efficacité agronomique de l'eau
WUE_{AGB}	: efficacité agronomique de l'eau calculée à partir de la biomasse aérienne sèche
WUE_{Yld}	: efficacité agronomique de l'eau calculée à partir du rendement
Yld	: rendement
α	: rapport entre l'aire contributive amont et l'aire de la parcelle aval
γ	: constante psychrométrique
ρ_a	: densité de l'air
τ	: coefficient de drainage

Introduction générale

L'augmentation de la demande alimentaire mondiale, en lien avec une population croissante, et la modification des régimes alimentaires en de nombreuses régions du globe (e.g., régimes plus riches en protéines, aliments moins onéreux) induisent transformations et intensifications au sein des modes de production agricole (Tilman and Clark, 2014; FAO, 2022). L'intensification agricole passe, entre autres, par une mobilisation significative des ressources naturelles, notamment des ressources en eau et en sol (Aguilera et al., 2020), causant ainsi leur surexploitation et leur dégradation (surexploitation des eaux souterraines, pollution des nappes et des cours d'eau, déforestation, salinisation des sols par les eaux d'irrigation...). Cette situation est aggravée par le changement climatique, et le sera plus encore dans les décennies à venir. Dans ce contexte, sécuriser l'alimentation au niveau mondial est l'un des plus grands défis pour les prochaines décennies.

La région méditerranéenne, où les ressources en eau sont les plus faibles (3% des ressources mondiales d'eau douce, Daccache et al., 2016) est particulièrement concernée par la problématique de la sécurité alimentaire. Dans cette région, la sécurité alimentaire rime avec la sécurité hydrique, puisque l'agriculture est la première consommatrice d'eau (Besbes et al., 2014), ce qui implique des enjeux sur les autres usages de cette ressource. Dans les pays méditerranéens, les politiques de gestion de la ressource en eau se sont principalement focalisées sur la mobilisation de l'*eau bleue*¹, incluant les eaux de pluie et les nappes phréatiques, pour développer l'agriculture irriguée et stabiliser la production agricole. Cependant, les modèles d'agriculture en vigueur sont très consommateurs d'eau : 70% des ressources en eau mobilisées sont consommées par l'agriculture irriguée. Il est attendu que ces problématiques soient exacerbées dans les décennies à venir, avec une évolution significative du forçage climatique qui se traduira très probablement par (1) une occurrence croissante des épisodes de sécheresse, (2) un accroissement des pertes en eau par évapotranspiration, et (3) une diminution des précipitations qui représentent la principale source d'eau renouvelable (Giorgi, 2006).

¹ Eau bleue : partie de l'eau qui s'écoule dans les rivières jusqu'à la mer, se trouve dans les lacs ou les retenues, percole vers les nappes souterraines ou est distribuée dans les canaux, etc. (FAO, 2020 ; Leenhardt et al., 2020).

Dans le contexte actuel, et plus encore dans celui du changement climatique, il est nécessaire de revisiter les stratégies de gestion des ressources en eau dans les agrosystèmes méditerranéens, pour assurer la sécurité alimentaire, tout en minimisant les pressions sur les ressources support. La mobilisation de l'*eau verte*², en particulier dans un contexte l'agriculture pluviale moins consommatrice d'eau et plus respectueuse de l'environnement, semblent être une voie prometteuse pour assurer la durabilité des systèmes agricoles et la sécurité alimentaire (Besbes et al., 2014 ; Daccache et al., 2016 ; FAO, 2022). Cette mobilisation d'eau verte est plus facile à mettre en œuvre dans des bassins versants ayant des topographies collinaires. En effet, ces derniers permettent la mise en place de techniques de captation des eaux de pluie et des eaux de ruissellement augmentant ainsi les quantités d'eau infiltrées dans la zone racinaire, au niveau des parcelles situées à l'aval.

Pour explorer la mobilisation de l'eau verte dans un contexte d'agriculture pluviale collinaire, plusieurs solutions existent, pouvant être de nature agronomique (e.g., rotation culturale, cultures couvrantes, organisation spatiale des cultures) ou hydrologique (e.g., techniques de conservation des eaux et des sols). Parmi ces solutions possibles, l'organisation spatiale des cultures, au sein du bassin versant, semble être une voie prometteuse qui permet de moduler les eaux de ruissellement, la consommation en eau des cultures, et la dynamique spatio-temporelle. L'exploration de cette voie peut être faite soit par expérimentation in-situ, soit par modélisation numérique. Certes la modélisation numérique est une approche moins réaliste que l'expérimentation numérique, mais elle permet simultanément (1) de réaliser des expérimentations sur de larges échelles spatio-temporelles dans des gammes de validité établies, et (2) de décroiser plusieurs facteurs d'influence.

L'exploration de l'organisation spatiale par modélisation nécessite de considérer l'extension spatiale de celle du bassin versant d'au moins quelques km². Ceci requiert de combiner la modélisation hydrologique et la modélisation du fonctionnement des cultures, afin de considérer les interactions entre le cycle de l'eau et le fonctionnement de la végétation cultivée, durant des périodes temporelles combinant année hydrologique et cycle cultural. D'une part, les modèles de culture ont été généralement développés pour des applications locales, à l'échelle de la parcelle. Leur application à l'échelle du bassin versant induit des enjeux méthodologiques liés, entre autres, aux domaines de validité de leurs hypothèses sous-jacentes

² Eau verte : fraction de pluie stockée dans le sol et disponible pour le fonctionnement des cultures (FAO, 2020).

et à l'hétérogénéité des milieux (hétérogénéités du climat, des sols, des cultures et des pratiques agricoles) (Faivre et al., 2009). Un premier type de spatialisation des modèles de culture est leur utilisation *multi-locale*, en exécutant le modèle d'une manière indépendante pour chaque unité de l'espace (parcelle) (Alaya et al., 2019). D'autre part, l'extension du bassin versant implique l'apparition de nouveaux processus (e.g., flux latéraux d'eau et de sédiments, propagation des pathogènes et des pesticides), qui ne peuvent être pris en compte par une application multi-locale des modèles (Pasquel et al., 2022). De plus, le fonctionnement des cultures est fortement influencé par la distribution spatiale des processus hydrologiques, notamment par les transferts d'eau latéraux et de sédiments, via la connectivité hydrologique. Une solution possible pour remédier à ce problème est le couplage d'un modèle de culture avec un modèle hydrologique distribué (Leenhardt et al., 2020), donnant naissance à une nouvelle catégorie de modèles, appelés modèles agro-hydrologiques.

Les travaux reposant sur la modélisation agro-hydrologique sous-tendent que la connectivité hydrologique inter-parcellaire influence le fonctionnement agronomique et hydrologique des bassins versants. Cette hypothèse est communément admise dans la communauté scientifique. Par exemple, il est entendu que la ré-infiltration des eaux de ruissellement, sur des sols non saturés, représente une quantité d'eau supplémentaire pour les cultures. Cependant, aucune étude ne s'est intéressée à la quantification de l'effet de cette connectivité hydrologique inter-parcellaire sur la productivité agricole. L'approfondissement de la connaissance scientifique sur l'importance de la connectivité inter-parcellaire est donc un préalable indispensable à la mise en œuvre de modélisations agro-hydrologiques distribuées.

L'évaluation de l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures, en combinant l'échelle de la parcelle et l'extension spatiale du bassin versant, et tout en croisant plusieurs facteurs d'influence, est très complexe. Une première étape de l'étude de cette connectivité est donc de considérer un cas d'étude simple, à une échelle spatiale réduite (deux parcelles amont/aval) et dont les résultats pourront servir d'éléments d'analyse pour l'extension au bassin versant. Pour cela, il faut s'assurer dans un premier temps de la capacité des outils de modélisation existants à simuler le fonctionnement de la végétation cultivée pour une diversité de conditions environnementales caractéristiques des agrosystèmes pluviaux méditerranéens en relief collinaire (culture, sol, climat). Ensuite, il est nécessaire de hiérarchiser les facteurs d'influence du premier ordre qui influencent le fonctionnement de la végétation cultivée, dont

possiblement la connectivité hydrologique inter-parcellaire, et d'identifier d'éventuelles situations typiques pour lesquelles l'effet de la connectivité est significatif.

En synthèse, l'objectif général de ce travail de thèse est d'analyser, par le biais de la modélisation numérique, l'effet de la connectivité hydrologique inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures. Ce manuscrit s'articule sous forme de quatre chapitres. Le premier chapitre détaille les enjeux scientifiques énoncés dans cette introduction, pour mettre en exergue l'importance de l'objectif de la thèse, mais aussi pour identifier les objectifs spécifiques qui en découlent, en lien avec les questions de recherche identifiées. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la démarche générale que nous avons adoptée, incluant le site d'étude et le jeu de données résultant, ainsi que les outils de modélisation sélectionnés. Dans le troisième chapitre, nous nous assurons que l'outil de modélisation choisi est capable de simuler le fonctionnement de la végétation cultivée pour une diversité de conditions environnementales. Pour cela nous réalisons une évaluation multicritère du modèle de culture utilisé dans un contexte d'agrosystème méditerranéen pluvial collinaire. Le quatrième chapitre est consacré à l'évaluation de l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures en lien avec la dynamique de l'eau dans le sol, dans un contexte de climat actuel. Nous terminons cette thèse par une conclusion générale, qui reprend les principaux résultats, qui discute des limites du travail et qui propose des perspectives. La Figure 1 ci-dessous synthétise la démarche générale de la thèse.

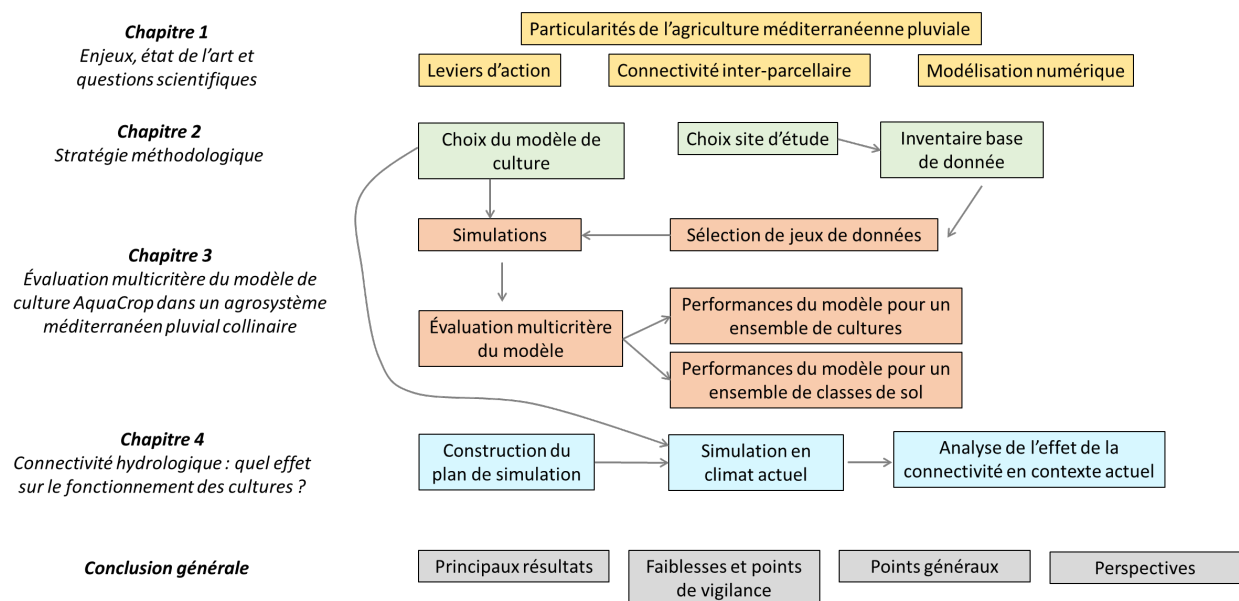


Figure 1.1 : Démarche générale de la thèse.

Chapitre 1 : Enjeux, état de l'art et questions scientifiques

Ce premier chapitre présente le cadre général dans lequel s'inscrivent les travaux de thèse. Nous commençons par la présentation du contexte général de l'agriculture pluviale méditerranéenne, en exposant ses caractéristiques et les pressions auxquelles elle fait face pour passer ensuite à l'importance du relief collinaire pour cette agriculture. Suit une étude bibliographique exposant : (1) les principaux processus biophysiques impliqués dans la gestion durable de l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire, (2) les leviers d'action pour gérer durablement l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire, (3) la métrique de gestion de l'eau agricole dans le cadre d'une agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire et (4) les différentes approches pour explorer les leviers d'action pour une gestion de cette agriculture. Nous abordons ensuite la modélisation agro-hydrologique comme outil d'aide à la gestion et nous identifions les lacunes soulignées dans cet état de l'art, pour enfin présenter l'objectif de la thèse et les questions scientifiques qui en découlent.

1. L'agriculture pluviale méditerranéenne : caractéristiques et pressions

1.1. Principales caractéristiques

En Méditerranée, l'agriculture pluviale est dominante, avec une utilisation de la surface agricole utile (SAU) dépassant 75% en Afrique du Nord (Figure 1.1). Ainsi, l'agriculture pluviale fournit une part considérable de la production agricole des pays méditerranéens et peut être considérée comme élément indispensable à la sécurité alimentaire de la population méditerranéenne (Wani et al., 2009). En Tunisie par exemple, l'agriculture pluviale occupe entre 92% et 94% de la SAU et fournit 65% de la production agricole du pays (FAO, 2022).

Cette agriculture pluviale est caractérisée par un large panel de cultures, comportant principalement des céréales d'hiver (blé, orge et avoine), très importantes pour l'alimentation humaine et animale, des fourrages de printemps (généralement des associations de vesce et d'avoine), des légumineuses (par ordre d'importance décroissante : féverole, pois chiche, lentille et haricot), de l'oléiculture, de la viticulture et des parcours (FAO, 2022). L'agriculture pluviale peut aussi être considérée, suivant les régions et les cultures, comme un système respectueux de l'environnement en raison de la faible utilisation d'intrants, engrais et produits phytosanitaires.

En Méditerranée, et malgré la rareté des ressources naturelles, notamment des ressources en eau et en sol, l'agriculture demeure un secteur très important au regard de sa place économique, sociale et environnementale.

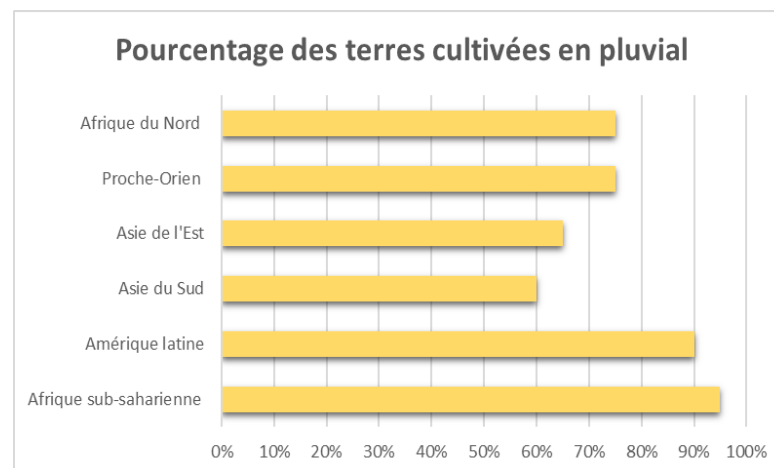


Figure 1.1 : Pourcentage des terres cultivées en pluvial dans différentes régions (Wani et al., 2009).

1.1.1. Caractéristiques économiques

Bien que l'agriculture ne soit plus l'une des composantes principales de l'économie nord-méditerranéenne, elle continue d'être un secteur économique clé dans les pays du sud et de l'est de la Méditerranée. Elle est considérée comme le premier fournisseur de produits agricoles (fruits et légumes) de l'Europe (AViTeM, <https://www.avitem.org/fr/content/avril-2018>). Elle participe aussi à l'activité économique en offrant 30% des emplois dans ces régions. À titre d'exemple, en 2012, 39.8% de la population marocaine travaille dans l'agriculture contre seulement 16.2% en Tunisie et 29.2% en Égypte (Tanyeri-Abur, 2015).

1.1.2. Caractéristiques sociales

En fournissant de l'emploi, l'agriculture participe à la réduction de l'exode rural de la population qui travaille majoritairement dans ce secteur (Tanyeri-Abur, 2015). Elle participe aussi au renforcement de la présence et du rôle de la femme dans la société. Dans les pays Nord-Africains, le pourcentage des femmes actives dans l'agriculture varie entre 30% et 70% selon les pays (Tanyeri-Abur, 2015). En 2012, le pourcentage des femmes travaillant dans l'agriculture est de 52.6% en Algérie, 32.9% en Tunisie et 73.3% en Libye (Tanyeri-Abur, 2015).

Contrairement à l'agriculture industrielle intensive, l'agriculture familiale³ est un modèle agricole durable, basé sur le principe d'une production diversifiée en accord avec les propriétés environnementales (propriétés pédologiques, climatiques...) de la région. En s'adaptant aux conditions naturelles difficiles de la région, l'agriculture familiale est un modèle ayant également montré son efficacité en Méditerranée. Selon le recensement agricole de 2010, l'agriculture familiale représente 97% du total des exploitations au sud de l'Europe (Bergeret et al., 2016). Ce modèle, caractéristique de la région, souffre malheureusement d'une forme de renoncement de la part des jeunes, et donc d'un flux migratoire important vers les grandes villes.

1.1.3. Caractéristiques sociotechniques

L'agriculture méditerranéenne possède une dimension sociotechnique très importante, se manifestant par deux principales caractéristiques : (1) la capacité des agriculteurs à appréhender

³ La FAO définit l'agriculture familiale comme étant un mode d'organisation de la production agricole, forestière, halieutique, pastorale et aquacole, gérée et conduite par une famille et qui repose principalement sur le travail familial, tant celui des femmes que celui des hommes. L'exploitation agricole et la famille sont liées, évoluent conjointement et réunissent des fonctions économiques, environnementales, sociales et culturelles (FAO, 2013).

des nouvelles techniques et approches agricoles pour adapter le système aux conditions environnementales et économiques actuelles et (2) l'héritage du savoir-faire ancestral.

Faces aux conditions naturelles particulières auxquelles les agriculteurs méditerranéens ont dû s'adapter, incluant la faible disponibilité des ressources en eau et les événements naturels extrêmes, un savoir-faire s'est développé pour devenir un héritage transmis de génération en génération (Aguilera et al., 2020). Il s'agit essentiellement des techniques de gestion des eaux et des sols. Ces techniques permettent le stockage des eaux de ruissellement, soit dans des citernes soit dans le sol, en les retenant par des constructions comme les diguettes et les demi-lunes, ou en favorisant l'infiltration des eaux de pluie par la mise en place de terrasses couramment nommées "terrasses méditerranéennes" (Yadari et al., 2019). Quant à la gestion des sols, elle est réalisée à travers la gestion de la biomasse, des résidus, des rotations culturales incluant les légumineuses (riches en azote, phosphore et calcium), de la matière verte fournie par les cultures fourragères (racines et tiges) et laissée au sol (Yadari et al., 2019), ainsi que par la mise en place de systèmes agroforestiers (Temani et al., 2021).

1.2. Pressions

Du fait de son importance, principalement économique et sociale pour les pays méditerranéens, l'agriculture pluviale subit de nombreuses pressions, d'origine anthropique, et qui se combinent avec le forçage climatique. Ces pressions sont liées d'une manière ou d'une autre entre elles, pouvant conduire, en cas de non intervention, à la pauvreté de la population (Figure 1.2).

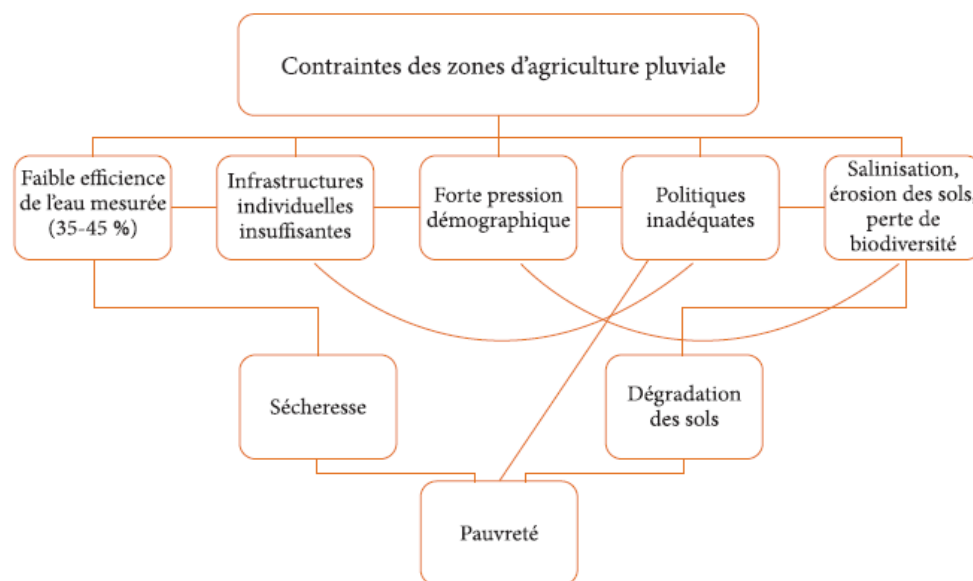


Figure 1.2 : Récapitulatif des pressions exercées sur l'agriculture pluviale méditerranéenne (Daccache et al., 2016).

1.2.1. Expansion démographique

La population méditerranéenne globale a connu une augmentation de 86% ces 50 dernières années pour passer de 280 millions d'habitants en 1970 à 522 millions d'habitants en 2020, avec une évolution plus marquée sur la rive sud, nommée Rive Afrique sur la Figure 1.3. Les projections prévoient 293 millions d'habitants sur cette même rive à l'horizon 2050, soit presque le nombre d'habitants sur les rives asiatique et européenne combinées (Léger et Parant, 2021). Cette augmentation de la population est accompagnée d'une augmentation des besoins alimentaires et donc de la nécessité d'accroître la production agricole pour assurer la sécurité alimentaire des populations.

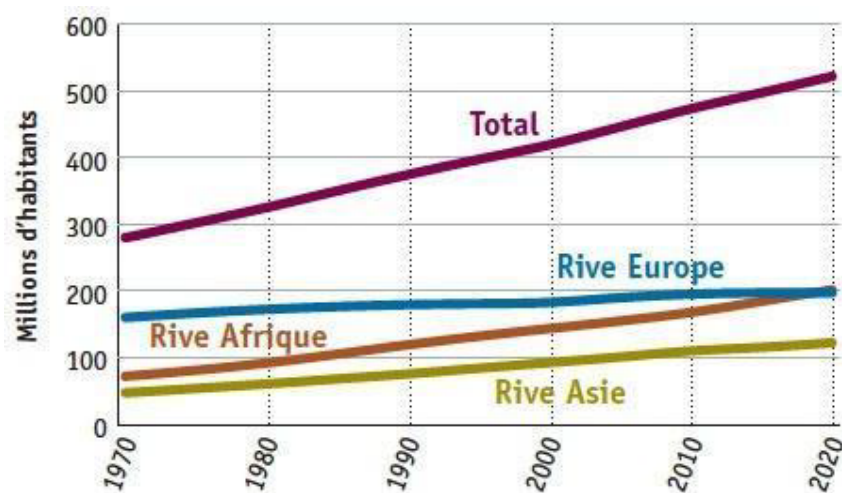


Figure 1.3 : Évolution démographique de la population méditerranéenne (Léger and Parant, 2021).

1.2.2. Surexploitation des ressources et mauvaises pratiques

L'augmentation de la population et la nécessité d'accroître la production agricole impliquent de fortes pressions sur l'environnement et les ressources naturelles. Cela se manifeste principalement par la destruction des habitats naturels via l'urbanisation, la déforestation et l'intensification de l'agriculture pour satisfaire la demande croissante en denrées alimentaires. Conjugées à une mauvaise utilisation des ressources (e.g., labour mécanisé dans le sens de la pente, monocultures, absence de jachère, cultures peu adaptées), l'urbanisation et l'intensification agricole entraînent une surexploitation des ressources en eau et en terres (Aguilera et al., 2020).

1.2.3. Politiques de gestion

Les politiques publiques méditerranéennes dédiées à la gestion des ressources en eau sont principalement focalisées sur des stratégies de mobilisation de l'eau bleue (Nouri et al., 2020) et sur le développement de l'agriculture irriguée, par la construction de barrages et de grands ouvrages de transferts, en accordant peu d'importance à l'agriculture pluviale. Cette dernière n'est pas prioritaire sur le plan budgétaire, avec une limitation des aides aux intrants et à la régularisation des situations d'urgence, comme dans le cas de sécheresses extrêmes (FAO, 2022). En Tunisie par exemple, bien que l'agriculture irriguée ne représente que 25% des productions végétales en équivalent-eau (rapport entre le volume d'eau mobilisé et la production agricole), alors qu'elle accapare 78% des ressources en eau bleue, la superficie des terres cultivées en irriguée s'est multipliée par sept au cours des 40 dernières années grâce aux stratégies de développement agricole et aux fonds consacrés à ce secteur (Besbes et al., 2014).

1.2.4. Forçage climatique

Le changement climatique se combine aux pressions anthropiques exercées sur la région méditerranéenne. Depuis l'ère préindustrielle, les émissions de gaz à effet de serre, particulièrement le CO₂, liées à l'activité anthropique, ne cessent d'augmenter. Le bassin méditerranéen n'échappe pas à ces changements. Il est même considéré comme l'une des régions les plus touchées au niveau mondial (Giorgi, 2006 ; Lionello et Scarascia, 2018) avec une rive sud plus vulnérable que les rives nord et est. Les projections climatiques prévoient une hausse des températures supérieure à la moyenne mondiale (20% de plus que la moyenne mondiale), associée à une intensification des vagues de chaleur extrême. La pluviométrie annuelle devrait aussi baisser, avec une réduction de 4% par degré de réchauffement, et les événements de précipitations extrêmes devraient s'intensifier, particulièrement sur la rive nord. Une augmentation de l'évapotranspiration est également prévue, et les périodes de sécheresse deviendraient plus longues, particulièrement sur la rive sud, impactant ainsi le cycle hydrologique (Cherif et al., 2020).

En Tunisie par exemple, les projections climatiques réalisées sur cinq bassins versants au nord, prévoient, d'ici la fin du siècle : (1) une diminution des précipitations de 16% pour le scénario RCP 4.5 et de 26% pour le scénario RCP 8.5, (2) une augmentation de la température de 1.2°C à 2.3°C pour le scénario RCP 4.5 et de 2.1°C à 4°C pour le scénario RCP 8.5, et (3) une augmentation de l'évapotranspiration de 3.5% à 11% pour le scénario RCP 4.5 et de 8.8% à 17% pour le scénario RCP 8.5 (Dakhlou et al., 2020).

1.3. Enjeux et perspectives de l'agriculture méditerranéenne pluviale

Compte tenu de sa sensibilité aux aléas climatiques et aux pressions anthropiques, induisant une dégradation des ressources, aux changements sociétaux liés à la migration de la main d'œuvre, ainsi qu'aux changements économiques dus aux fluctuations des prix des produits sur les marchés, l'agriculture pluviale est considérée comme un système fragile (El Amami et al., 2018). Il est donc primordial de fournir les efforts nécessaires au maintien voire au développement de l'agriculture pluviale, moins consommatrice en eau que l'agriculture irriguée (Daccache et al., 2016), bien que présentant des rendements inférieurs.

Face à une telle situation, il devient nécessaire, voire urgent, de trouver des nouveaux modes de gestion permettant la préservation des ressources, l'assurance de la production agricole et son adaptation au changement climatique. Le défi de la génération actuelle et es générations futures n'est pas de produire plus, mais plutôt d'essayer de trouver un compromis entre sécurité alimentaire et préservation des ressources naturelles. Il nous faut donc envisager un panel de solutions possibles, et définir de nouveaux systèmes agricoles répondant à de multiples attentes, souvent contradictoires.

À retenir

L'agriculture pluviale est un secteur stratégique pour les pays méditerranéens, présentant encore des marges de manœuvre et un potentiel important d'amélioration de sa productivité. Il est donc indispensable de trouver des stratégies de gestion pour assurer la durabilité du système et de la sécurité alimentaire de la population méditerranéenne.

2. Importance du relief collinaire en Méditerranée

Le pourtour méditerranéen est caractérisé par une forte occurrence de reliefs collinaires (Figure 1.4), sièges d'une activité agricole intense (Mekki et al., 2018b). Ces reliefs jouent un rôle socio-économique important pour les pays méditerranéens. En effet, contrairement aux reliefs montagneux, les moyennes altitudes (quelques centaines de mètres) des reliefs collinaires et leurs pentes moyennement douces facilitent l'installation d'une activité agricole, le travail du sol et la mise en place de techniques de collecte des eaux de pluie et de ruissellement (Ammar et al., 2016 ; Mekki et al., 2018b). Ces derniers permettent (1) l'amélioration du rendement de l'agriculture pluviale en favorisant l'infiltration des eaux de pluie, (2) le développement de l'agriculture irriguée et (3) la recharge des nappes superficielles (Harmanny et Malek, 2019).



Figure 1.4 : Carte d'altitude du pourtour méditerranéen (<https://fr-fr.topographic-map.com/>).
L'altitude d'un relief collinaire ne dépasse généralement pas 600 m d'altitude.

Les reliefs collinaires sont caractérisés par une variabilité spatiale de leurs propriétés biophysiques tels que la profondeur du sol, le couvert végétal, l'humidité du sol et les flux sol-atmosphère (Tromp-van Meerveld et McDonnell, 2006 ; Chen et al., 2022). En effet, la topographie de ces reliefs, définie par leur morphologie et leur pente (gradient et longueur) (Chen et al., 2022), favorise le ruissellement de surface ainsi que les écoulements sub-surface du haut vers le bas de la pente (Buda, 2013). Sur leur trajet, les eaux ruisselées déplacent les sédiments et les nutriments (Zhang et al., 2018), engendrant ainsi des sols plus profonds et plus fertiles en aval du relief.

Cette variabilité spatiale de la profondeur du sol a notamment un impact sur la variabilité spatiale du couvert végétal, en favorisant la mise en place de plantes ayant un système racinaire profond en aval de la colline (Abd-Elmabod et al., 2017). Le développement du couvert végétal en conditions de relief collinaire est aussi influencé par les conditions d'humidité du sol, due à la remontée du niveau de la nappe en aval (Buda, 2013), engendrant ainsi un couvert plus développé et plus dense, par rapport à la végétation se trouvant en haut de la colline.

La variabilité spatiale de la végétation influence, quant à elle, le microclimat (e.g., vitesse du vent), les paramètres micro-météorologiques (e.g., résistance aérodynamique) et le bilan hydrique du sol. En effet, la végétation joue un rôle de freinage de l'écoulement du vent par l'augmentation de la rugosité, entraînant une diminution de sa vitesse. Elle influence aussi la résistance aérodynamique (Young et al., 2021), qui dépend de la hauteur et de la structure de la

végétation (Zitouna-Chebbi, 2009). La végétation influence aussi le bilan hydrique du sol en conditionnant l'évapotranspiration réelle (Mekki et al., 2014), représentant environ deux tiers du bilan hydrique du sol en région semi-aride et aride : un couvert dense transpire plus d'un couvert épars, tout en limitant l'évaporation du sol.

Au même titre que la végétation, le relief influence également le microclimat et les flux sol-atmosphère :

- microclimat : sur un relief collinaire, la température ne dépend que de son altitude. En effet, au niveau de la troposphère (du sol jusqu'à une altitude moyenne de 11 km), la température est caractérisée par son gradient thermique vertical négatif : elle diminue d'environ 0.6°C tous les 100 m (Guyot et Mamy, 1997). Quant au vent, il est affecté à la fois par l'altitude totale de la colline et par sa pente. En effet, le vent exerce un champ de pression qui engendre des vitesses plus importantes aux sommets et plus faibles dans les vallées. De plus, sur le versant face au vent, qui est caractérisé par un vent ascendant, les lignes de courant suivent la pente et l'écoulement est donc comparable à un écoulement sur terrain plat. Sur le versant sous le vent, caractérisé par un vent descendant, une dilatation des courants se produit pouvant engendrer l'apparition d'une zone de turbulence (Raupach et Finnigan, 1997).
- flux surface-atmosphère : l'influence de la topographie sur les échanges radiatifs se traduit principalement par une variation du rayonnement solaire incident. En effet, le rayonnement direct varie fortement en fonction de la pente du relief (inclinaison par rapport à l'horizontale) et de son orientation (azimut par rapport au nord géographique). Selon Garnier et Ohmura, (1968) ; Durand et al. (1981) ; Tian et al. (2001), la topographie peut engendrer jusqu'à 30% de variation du rayonnement solaire durant une journée claire. Ces variations de pente et d'inclinaison expliquent que la captation soit maximale lorsque les rayons arrivent perpendiculairement à la surface et qu'un versant exposé au sud soit plus chaud qu'un versant exposé au nord, à altitude égale (Cruziat et Lagouarde, 1995). En ce qui concerne les flux convectifs, plusieurs études ont montré que la présence des collines modifie considérablement les flux de surface via une modification des différents paramètres tels que la longueur de rugosité mécanique et la température de surface, selon la direction du vent (Zitouna-Chebbi et al., 2023).

À retenir

Compte tenu de son occurrence sur le pourtour méditerranéen, de l'importance de son rôle socio-économique pour les pays méditerranéens et de sa particularité en termes de variabilité spatiale de ses propriétés biophysiques, nous avons décidé de nous focaliser, dans ce présent travail, sur l'étude de l'agriculture méditerranéenne pluviale **en relief collinaire**.

3. Bassin versant : siège de nombreux processus biophysiques indispensables à la gestion durable de l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire

Avant d'aborder la question des stratégies de gestion visant à assurer la durabilité de l'agriculture pluviale méditerranéenne, il est important de bien comprendre les différents processus biophysiques observés au niveau du bassin versant, pouvant influencer la croissance et la production des cultures. Nous nous intéressons à l'entité du bassin versant car ce dernier est considéré comme étant le territoire de référence pour la gestion des eaux douces (Petit, 2020).

Un bassin versant peut-être défini comme une « région qui possède un exutoire commun pour ses écoulements » (Anctil et al., 2012). L'ensemble des eaux qui tombent dans cette aire converge vers un même point de sortie appelé exutoire. La ligne de partage des eaux, ou ligne de crête, permet de déterminer les eaux allant dans le bassin considéré ou vers le bassin voisin » (Lasserre and Brun, 2018). Un bassin versant se compose : (1) d'objets naturels tels que le sol, l'atmosphère, la végétation (naturelle et/ou cultivée), le réseau hydrographique, l'aquifère, et (2) d'objets anthropiques tels que les parcelles (cultivées ou non) et les aménagements hydro-agricoles (e.g., les réseaux de drains et les fossés). Le bassin versant est le siège de nombreux processus en lien, principalement, avec le cycle des cultures et le cycle de l'eau. Il est aussi caractérisé par une forte variabilité spatio-temporelle des conditions environnementales (couverts végétaux, sols, distribution de l'humidité du sol), influençant le cycle de la culture et le cycle de l'eau (Anctil et al., 2012). Étant donné que nous nous intéressons ici à la productivité agricole, cette partie se focalise sur la présentation (1) des caractéristiques générales des deux composantes du bassin versant, à savoir, le sol et l'atmosphère, en lien avec le cycle de la végétation, (2) du cycle de la culture, (3) du cycle de l'eau et (4) de la relation entre ces deux cycles.

3.1. Caractéristiques générales du sol et de l'atmosphère

La plante vit dans deux milieux différents : le sol pour sa partie racinaire et l'atmosphère pour sa partie aérienne, composée de tiges, de feuilles, de fleurs et de fruits.

3.1.1. Le sol

Le sol est une formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la désagrégation et de l'altération de la roche mère sous-jacente et de l'enrichissement en matières organiques, sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques (Soltner, 1985 ; Archambeaud et Thomas, 2016). D'une manière générale, le profil du sol est différencié en trois horizons : l'horizon A organo-minéral, l'horizon B moins riche en matière organique et l'horizon C qui n'est autre que la roche mère. Cependant, il existe des sols ayant des profils non différenciés en horizons tels que les Vertisols, Oxisols et Histosols (Soltner, 1985).

Le sol est défini par ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Ces caractéristiques physico-chimiques sont étroitement liées à l'environnement (e.g., conditions climatiques), possédant ainsi une forte variabilité spatiale et temporelle (Calvet, 2013).

Les caractéristiques physiques : la texture du sol et sa structure sont les deux caractéristiques fondamentales du sol. Ensembles, elles permettent une première appréciation des qualités du sol telles que sa stabilité, sa capacité de rétention de l'eau et sa fertilité. La texture du sol désigne les proportions relatives de ses constituants minéraux (argile, limon, sable) (Soltner, 1985). Les sols argileux et limoneux sont théoriquement plus fertiles et ont une meilleure capacité de rétention de l'eau que les sols sableux grâce, entre autres, à une plus grande surface d'échange avec la solution du sol (eau) en lien avec la taille des particules élémentaires (Calvet, 2013).

Cousin et al. (2022) définissent le sol comme un réservoir, pouvant contenir de l'eau. La quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, et pouvant être utilisée par les plantes est appelée réservoir utile (RU). Cette quantité d'eau maximale est comprise entre deux limites, une inférieure correspondant au point de flétrissement permanent (PWP pour *permanent wilting point*) et une supérieure, correspondant à la capacité au champ (FC pour *field capacity*) (Néron, 2018 ; Cousin et al., 2022). Le réservoir utile est déterminé pour une profondeur de sol donnée (Équation 1.1) et est le plus souvent exprimé en mm, comme pour les précipitations. La capacité au champ est la quantité d'eau présente après ressuyage, soit lorsque l'eau gravitaire s'est

écoulée. En effet, le volume d'eau dépassant la capacité au champ, occupant la macro-porosité du sol, s'écoule rapidement en-dehors de la zone racinaire par gravité, vers l'aquifère (Néron, 2018). Le point de flétrissement permanent est la quantité d'eau en dessous de laquelle la plante ne peut plus extraire d'eau et satisfaire ses besoins. Il dépend des forces de succion des plantes et des forces d'adsorption des particules du sol (Néron, 2018). Il est important de faire la distinction entre réservoir utile et réserve utile. Cette dernière correspond à la quantité d'eau réellement stockée dans le sol, à un instant donné (Cousin et al., 2022). Nous pouvons ainsi dire que le réservoir utile représente le contenant, alors que la réserve utile, représente le contenu.

$$RU = \sum_{i=1}^{maxProf} \Delta z_i (FC_i - PWP_i) \quad (1.1)$$

avec :

- FC : humidité du sol à la capacité au champ
- PWP : humidité du sol au point de flétrissement permanent
- maxProf : profondeur maximale du sol
- Δz : profondeur de l'horizon du sol considéré
- i : horizon du sol

La structure du sol est le résultat d'assemblage des particules minérales et de matière organique. Elle influence la porosité du sol et ainsi son régime thermique (conductivité, capacité calorifique, cinétique de refroidissement et de réchauffement), le développement racinaire, ainsi que l'activité biologique du sol. La stabilité du sol est définie comme sa capacité à conserver sa structure dans le temps face à l'action de la pluie, du vent ou du travail du sol grâce à la solidité des assemblages des particules fines du sol (Calvet, 2013).

Caractéristiques chimiques et biologiques : les caractéristiques chimiques du sol résultent des réactions entre les minéraux et les fluides circulant dans les pores du sol (l'eau du sol). La texture, la structure et le climat jouent un rôle fondamental dans la nature et la dynamique de ces réactions. L'activité biologique du sol est en étroite interaction avec la chimie du sol, étant influencée et influençante. La microflore (champignons, algues, bactéries) participe principalement à la minéralisation et à l'humification de la matière organique présente dans le sol, influençant ainsi la fertilité du sol et l'alimentation minérale de la plante. Quant à la faune du sol (e.g., vers de terre), leur activité présente une triple action : mécanique, chimique et

biologique (Coleman et al., 2004). L'action mécanique consiste à la formation d'agrégats (turricules) qui protègent le sol du lessivage grâce à leur stabilité, et à l'amélioration de la porosité du sol pour une meilleure circulation de l'air et de l'eau. Les actions chimique et biologique consistent principalement à la lutte contre le lessivage et l'enrichissement en minéraux assimilables, la décomposition et la désagrégation de la matière organique, le transport vertical des éléments minéraux et organiques ainsi que l'augmentation de l'activité microbienne.

3.1.2. L'atmosphère

L'atmosphère est définie comme une enveloppe de gaz entourant la planète. Elle se décompose en plusieurs couches, se différenciant entre autres par leurs profils thermiques. La couche où se déroule la plupart des phénomènes météorologiques est la troposphère. Par facilité de langage, nous utiliserons le terme d'*atmosphère* pour désigner la couche d'air, de quelques mètres d'épaisseur, où se déroulent les interactions du continuum sol-plante-atmosphère qui nous intéressent dans notre étude. L'état dans lequel se trouve l'atmosphère à un instant donné, dans un endroit donné, est principalement caractérisé par la température et l'humidité de l'air, le rayonnement solaire incident, la direction et la vitesse du vent, et les précipitations, définissant ainsi les variables météorologiques (FAO, 2021). L'étude statistique de ces variables sur une période longue, par convention 30 années, définit le climat de la zone étudiée (FAO, 2021). Les conditions météorologiques conditionnent la croissance de la plante de leur impact sur les interactions entre surface (sol et couvert végétal) et l'atmosphère

3.2. Cycle de culture

Nous consacrons cette partie à l'explication du rôle que joue le sol et l'atmosphère dans le fonctionnement de la culture.

3.2.1. Interactions sol-plante

Le sol présente deux principales fonctions par rapport à la culture : il est considéré comme son support physique, en contenant sa partie racinaire et assure aussi ses besoins nutritifs en termes d'eau, de carbone, d'éléments nutritifs organiques et minéraux (Archambeaud et Thomas, 2016).

3.2.2. Interactions atmosphère-plante

Chaque variable météorologique influence d'une manière ou d'une autre la croissance et le développement de la culture. Nous nous focalisons dans cette section sur l'influence de la température de l'air, du vent, du rayonnement solaire et des précipitations.

La température de l'air impacte le développement et la vitesse de croissance de la plante (Néron, 2018). La relation entre la température de l'air et la croissance de chaque plante est caractérisée par plusieurs seuils de température, dont au moins deux : un minimum, appelé température de base (T_{base}) (ou zéro de végétation) et un maximum, appelé température maximale (T_{max}). Des températures très supérieures ou inférieures à ces seuils entraînent la mort de la plante. La croissance des plantes augmente à partir du zéro de végétation jusqu'à un intervalle de température optimum, puis décroît jusqu'à s'arrêter lorsque les températures sont trop élevées. Entre le zéro de végétation et la température optimale, la vitesse de développement de la plupart des plantes est proportionnelle à la température, ce qui conduit à la notion de somme de degrés-jours, qui permet de quantifier la durée des phases de développement des plantes (durées entre les différents stades phénologiques) en fonction de la température (voir 3.2.3). De plus, certaines plantes ont besoin, pour leur développement, d'une alternance de périodes froides et de périodes chaudes, c'est le thermo-périodisme annuel (Soltner, 1984). Une plante pousse moins bien si elle est soumise à la même température de nuit et de jour. D'autres ont besoin d'être exposées à de basses températures à l'état de semence ou durant leur stade juvénile afin de passer du stade végétatif au stade reproducteur, il s'agit de la vernalisation. Dans ce cas, la durée et l'intensité de la période de froid dépendent des espèces et des variétés (Soltner, 1984 ; Néron, 2018).

Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. En fonction de sa vitesse, le vent joue un rôle utile ou néfaste sur la croissance végétale. Un vent modéré (1) participe à l'évaporation de la couche superficielle du sol, contribuant ainsi à son aération, (2) assèche aussi le feuillage de la plante, assurant ainsi sa protection contre les attaques des champignons et des parasites et (3) contribue, en fonction des espèces, à la pollinisation (Soltner, 1984). Mais à partir d'une certaine force, le vent peut favoriser l'érosion du sol, déformer les arbres et plants, perturber l'irrigation par aspersion, causer des dégâts importants aux structures et cultures et augmenter significativement l'évapotranspiration (voir section 3.3.1) (Soltner, 1984).

Le rayonnement solaire incident détermine la croissance de la plante en influençant deux processus (Soltner, 1984) : le photopériodisme et la photosynthèse. Le photopériodisme est défini comme la sensibilité de la plante à la durée du jour tandis que la photosynthèse est définie comme le processus de fabrication du glucose, nécessaire à la croissance de la plante, à partir du rayonnement solaire (Fageria et al., 2006). La photosynthèse a lieu principalement au niveau des feuilles. Pour la réalisation de ce métabolisme, la plante absorbe l'eau et les minéraux du sol par ses racines et le CO₂ atmosphériques par les stomates pour les transformer, à l'aide de l'énergie solaire, en glucose (Soltner, 1984). Vis-à-vis de la photosynthèse, on distingue deux principaux types de plantes : plantes en C₃ (e.g., blé, orge, fève) et plantes en C₄ (e.g., maïs, sorgho, canne à sucre) (Mbava et al., 2020). La nature de la molécule produite lors de l'assimilation du CO₂ atmosphérique détermine la différence entre ces deux groupes. La molécule produite chez les plantes en C₄ contient 4 carbones alors que les plantes en C₃ produisent une molécule à 3 carbones. Les plantes en C₄ possèdent un rendement photosynthétique plus important que les plantes en C₃ (Mbava et al., 2020). Lors de l'ouverture des stomates pendant la photosynthèse, la plus grande partie de l'eau absorbée par les racines va être rejetée dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau : c'est la transpiration végétale (Tr). La totalité de la transpiration végétale se fait au niveau des organes végétaux possédant des stomates (principalement les feuilles) à travers les pores stomatiques dont l'ouverture et la fermeture sont contrôlées par l'humidité du sol, le rayonnement solaire, la température de l'air et le déficit de pression de vapeur dans l'air. La transpiration végétale et la photosynthèse sont ainsi fortement liées puisque que la fermeture des stomates, due par exemple à un assèchement du sol dans la zone racinaire, entraînera à la fois une réduction de la transpiration (flux de vapeur d'eau) et une réduction de la photosynthèse (flux de CO₂ et d'O₂).

Les précipitations sont la principale source d'eau pour la plante, soit directement par infiltration des pluies dans le sol, soit indirectement par alimentation des nappes, ou plus indirectement en alimentant une source permettant l'irrigation. L'eau de pluie, pénétrant dans le sol par infiltration et se trouvant dans la zone racinaire joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la plante en conditionnant sa photosynthèse (Soltner, 1984 ; Néron, 2018). De faibles quantités d'eau dans la zone racinaire induisent une fermeture des stomates, limitant ainsi la photosynthèse et donc la croissance. (Kaur et Arora, 2021). L'ampleur de cet état dépend du stade du développement et de la durée de la période du stress hydrique (Farooq et al., 2017 ; Zhang et al., 2018). Un excès d'eau peut aussi avoir un effet négatif sur la croissance végétale

en réduisant la quantité d'oxygène dans la zone racinaire et provoquant ainsi une asphyxie des racines (Tian et al., 2021).

3.2.3. Différentes phases du cycle de développement de la culture

Le cycle de croissance et de développement d'une culture peut être décrit principalement par quatre stades : le semis (Sm), la levée (L), le début de la floraison (DF) et la maturité physiologique (MF). Les périodes entre S-L, L-DF et DF-MF correspondent à la phase de germination, la phase de croissance et la phase reproductive, respectivement (Soltner, 1985). Étant donné que la vitesse de la croissance de la plante est contrôlée par la température, le cycle de croissance de la plante peut être exprimé en temps thermique, considéré comme le cumul des températures efficaces pour le développement. Le temps thermique est exprimé en unité de degré-jour (GDD pour *Growing Degree Days*). Un degré-jour est égal à la différence entre la température moyenne journalière ($T_{moyenne}$) et la température de base de la culture (T_{base}) (Équation 1.2) (Néron, 2018).

$$GDD = T_{moyenne} - T_{base} \quad (1.2)$$

La croissance, le développement et la production des cultures sont généralement décrits à un pas de temps journalier et à une échelle locale, généralement celle de la parcelle.

3.3. Cycle de l'eau

3.3.1. Composantes du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est décrit par : (1) les précipitations, (2) l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol, (3) les écoulements de surface décrits par la genèse et la propagation du ruissellement (4) la percolation (ou drainage) de l'eau infiltrée vers la nappe superficielle, (5) les écoulements sub-surfaciques, (6) l'évaporation du sol et (7) la transpiration des plantes (Figure 1.5).

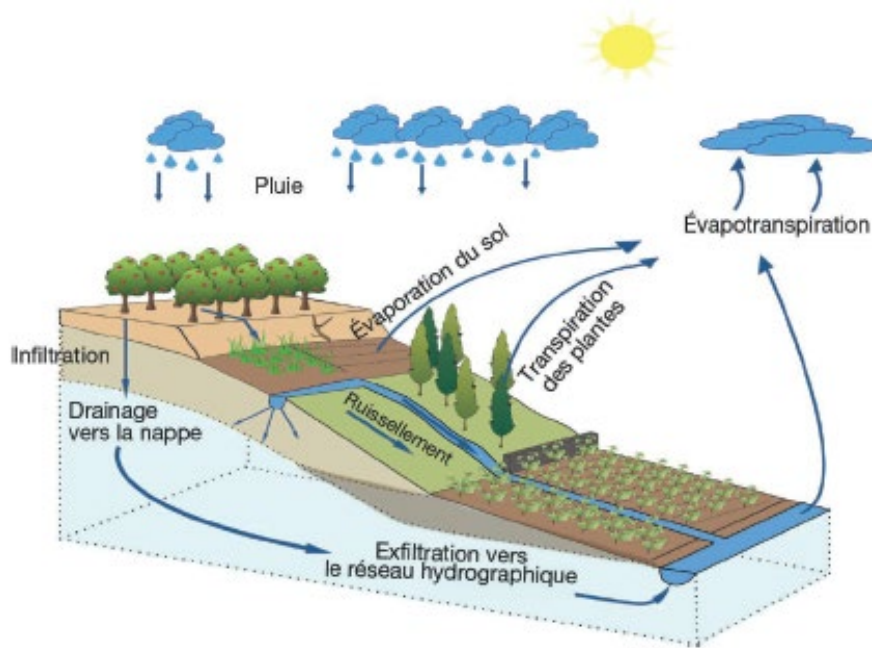


Figure 1.5 : Principales composantes du cycle de l'eau (Leenhardt et al., 2020).

Les précipitations : sous l'effet des conditions atmosphériques, traduites par l'évapotranspiration de référence (voir plus loin), une partie de l'eau stockée dans différents types de réservoirs (océans, lacs, rivières, sols, plantes) s'évapore, à leur surface, dans l'atmosphère. La pluie se forme lorsque des gouttelettes d'eau, formées par la condensation de la vapeur d'eau d'une masse d'air humide, sont suffisamment grosses. La formation des gouttelettes nécessite un refroidissement de la masse d'air jusqu'à atteindre le point de rosée, ainsi que la présence d'aérosols, supports de la condensation. Selon l'endroit étudié, les précipitations peuvent être saisonnières ou présentes toute l'année. Certaines régions connaissent une forte variabilité interannuelle tandis que d'autres ne présentent que peu de variabilité infra-annuelle (Anctil et al., 2012).

Infiltration : hormis une faible partie de l'eau de pluie interceptée par le feuillage de la végétation et évaporée très rapidement, l'eau de pluie va soit s'infiltrer dans le sol, soit ruisseler à sa surface. La capacité d'infiltration décrit le flux d'eau maximal que le sol peut absorber durant une période donnée. Elle varie dans le temps et diminue au fur et à mesure que le sol s'humidifie. Lors d'une pluie, la capacité d'infiltration est très élevée au début et tend vers la valeur de la conductivité hydraulique à saturation du sol (K_{sat}). La teneur initiale en eau et l'état de la surface influencent la capacité d'infiltration. Un sol nu a une plus faible capacité d'infiltration, notamment du fait que les gouttes d'eau peuvent déplacer des particules et boucher les pores, limitant ainsi l'infiltration de l'eau. À l'opposé, un sol de forêt a une capacité

d'infiltration forte, les racines et la faune du sol entretiennent un réseau de macropores favorisant l'infiltration (Anctil et al., 2012).

Ruissellement : l'eau de pluie non infiltrée dans le sol va ruisseler tout au long du bassin versant. Deux mécanismes de genèse de ruissellement de surface existent. Le premier type de ruissellement, dit ruissellement par excès d'infiltration, ou ruissellement hortonien, apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol. Ce premier type de ruissellement est principalement observé dans des régions arides et semi-arides, caractérisées par des événements pluvieux courts et de forte intensité (Buda, 2013 ; Anctil et al., 2012).

Le deuxième type de ruissellement est celui par saturation. Il se produit majoritairement en bas de pente des bassins versants, suite à la montée du niveau de la nappe superficielle, saturant la surface du sol et empêchant l'infiltration. Les pluies sur la partie du bassin non saturée vont y contribuer indirectement en alimentant par percolation la nappe superficielle, qui va encore monter et élargir la surface des sols saturés. Le ruissellement par saturation peut aussi se produire sur les sols peu profonds. En effet, il arrive que le sol soit entièrement saturé, et bloque ainsi le processus d'infiltration (Anctil et al., 2012). Ce type de ruissellement est principalement observé dans des régions tempérées et humides, caractérisées par un nombre élevé d'événements pluvieux (Buda, 2013).

D'une manière générale, la genèse du ruissellement dépend de plusieurs facteurs, à savoir : (1) les caractéristiques des pluies en termes de quantité, durée, fréquence, intensité (2) les caractéristiques du sol : texture et structure. Nous pouvons citer en exemple qu'une porosité élevée favorise l'infiltration et qu'à contrario la présence de croûtes à la surface du sol colmatant les pores, diminue l'infiltration, favorisant ainsi le ruissellement (Anctil et al., 2012). Certains éléments contribuent indirectement au ruissellement, comme les plantes, ou directement, comme les pratiques de gestion agricole, en modifiant les caractéristiques du sol et donc les capacités d'infiltration de l'eau dans le sol (Anctil et al., 2012). Concernant la végétation, la densité du couvert végétal et la présence de résidus de plantes au sol limitent la formation de croûtes et favorisent l'infiltration (Anctil et al., 2012) (voir détails dans la section 4.1). De même, le système racinaire améliore l'infiltration en créant des macropores (Anctil et al., 2012).

La topographie des bassins versants joue aussi un rôle important dans la propagation du ruissellement. Son rôle n'est pas lié uniquement au gradient de la pente, mais aussi à la

géométrie et la longueur de celle-ci (Chen et al., 2022), qui déterminent l'intensité et la direction des écoulements. Le gradient de la pente conditionne la vitesse des écoulements superficiels (Chen et al., 2010 ; Buda, 2013). Le ruissellement est aussi influencé par la longueur de la pente : de nombreuses études ont montré que le ruissellement de surface peut diminuer avec l'augmentation de la longueur de la pente, à cause de la ré-infiltration de la lame d'eau ruisselée (Chen et al., 2010, 2016). Cette ré-infiltration de la lame d'eau ruisselée s'explique par la variabilité spatiale des conditions environnementales, telles que le types du sol, la végétation, la distribution spatiale de l'humidité du sol. Sous les mêmes conditions environnementales, la diminution du ruissellement avec la longueur de la pente peut s'expliquer par l'augmentation du temps d'infiltration (Zhang et al., 2019). La quantité d'eau ruisselée dépend aussi de la superficie drainée, appelée aussi aire contributive : plus l'aire contributive est grande, plus le volume d'eau ruisselé est important (Gnouma, 2006).

Percolation et écoulement sub-surfacique : une fois le réservoir utile du sol rempli, soit une fois la capacité au champ dépassée, le sol est saturé en eau. La quantité d'eau dépassant la capacité aux champs est destinée soit à percoler en profondeur grâce à la gravité et rejoindre une nappe superficielle, soit à s'écouler latéralement suivant le gradient hydraulique, entre les couches du sol (ou à la surface d'une couche imperméable, e.g., roche mère) (Weiler et al., 2005 ; Wang et al., 2020), donnant naissance à des nappes perchées (Anctil et al., 2012). Ces écoulements latéraux sont appelés écoulements sub-surfaciques (plus anciennement écoulements hypodermiques) (Anctil et al., 2012 ; Musy et al., 2014). Ils apparaissent lorsque le niveau de la nappe phréatique remonte, et sont alors appelés écoulements de base, ou lors de la création d'une zone de saturation, suite à une infiltration importante des eaux de pluie (Weiler et al., 2005). Une zone de saturation peut apparaître lorsque, entre deux horizons du sol, la texture et le coefficient d'infiltration changent, provoquant un ralentissement de la percolation et l'apparition d'une zone de saturation à la frontière entre ces deux horizons (Anctil et al., 2012 ; Musy et al., 2014). En cas de pluies intenses et continues, ces situations peuvent donner naissance à un ruissellement de surface par saturation. Les écoulements sub-surfaciques rejoignent ensuite le réseau hydrographique de surface par exfiltration (Anctil et al., 2012). Ces écoulements sont plus lents que le ruissellement de surface : l'eau qui rejoint la nappe phréatique en profondeur va circuler plus lentement. La vitesse de circulation dépend des caractéristiques du sous-sol où l'eau est stockée.

Évaporation du sol : c'est le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur, à la surface du sol. Ce processus dépend principalement des conditions météorologiques (énergie solaire, température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent). En effet, le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux nécessite à la fois une grande quantité d'énergie (chaleur latente de vaporisation) et l'existence d'un gradient de pression partielle de vapeur d'eau entre le sol et l'air. Le rayonnement solaire est la principale source d'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau. L'élimination de la vapeur d'eau de la surface évaporée vers l'atmosphère est assurée par la différence de pression vapeur d'eau entre cette surface et l'air et un air sec favorise l'évaporation. Le renouvellement de l'air dépend principalement de la vitesse du vent, qui favorise l'évaporation (Allen et al., 1998).

Dans le cas où le sol est la surface évaporative, l'eau est plus difficilement évaporable que celle d'un plan d'eau, tels les lacs ou les rivières. Lorsque le sol est saturé, on considère que l'évaporation du sol est aussi importante que celle d'un plan d'eau, mais lorsque la quantité d'eau du sol diminue, l'évaporation devient inférieure car les molécules d'eau sont plus fortement liées aux particules de sol par les forces d'adsorption. La contribution d'un sol à l'évaporation est étroitement liée à sa texture, à sa température et à la circulation de l'air et de l'eau dans ses premiers centimètres. Le front d'évaporation est défini comme la profondeur maximale du sol contribuant à l'évaporation, avec une contribution plus importante de la surface du sol que des couches plus profondes. La fraction du rayonnement solaire absorbée par la surface détermine la capacité d'un sol à se réchauffer. Un sol clair se réchauffe moins vite qu'un sol sombre. La végétation influence aussi l'évaporation du sol en diminuant l'énergie solaire incidente au niveau du sol (Allen et al., 1998).

Transpiration végétale : c'est l'évaporation de l'eau contenue dans les tissus de la plante. La transpiration a lieu majoritairement au niveau des feuilles, grâce à l'ouverture des stomates. Comme pour l'évaporation du sol, la transpiration est influencée par les conditions météorologiques, mais elle est plus complexe à exprimer et à décrire car elle dépend aussi d'autres facteurs comme les caractéristiques de la culture, les pratiques agricoles ou le stade de développement de la plante (Allen et al., 1998).

Évapotranspiration : ensemble, l'évaporation et la transpiration forment la quantité d'eau transférée à l'atmosphère par évapotranspiration (ET). Le processus d'évapotranspiration est le plus complexe à appréhender. Durant un cycle cultural, l'évaporation et la transpiration ont lieu simultanément, et il est difficile de distinguer les deux processus (Allen et al., 1998). Au début

du cycle cultural, où la végétation n'est pas encore développée, l'évapotranspiration est dominée par l'évaporation du sol. Au fur et à mesure que le couvert végétal se développe, la transpiration devient dominante et l'évaporation du sol devient alors très faible. L'évapotranspiration joue un rôle important à l'échelle du cycle de l'eau. Elle détermine, en fonction de son intensité, si l'eau rejoindra le réseau hydrographique ou directement l'atmosphère. En effet, une évapotranspiration élevée ne laisse pas le temps à l'eau de percoler ou de ruisseler jusqu'au réseau hydrographique. À titre d'exemple, sous un climat méditerranéen, la majorité de l'eau de pluie est évaporée ou transpirée. Afin de prévoir et d'estimer les flux d'eau perdus par évapotranspiration, de nombreux modèles et méthodes ont été proposées, notamment l'estimation par bilan hydrique ou par bilan énergétique, etc.

L'ouvrage *Crop Evapotranspiration*, n°56 de la division Irrigation et drainage de la FAO (Allen et al. 1998), que nous appellerons par la suite « FAO-56 » propose une méthode d'estimation de la quantité d'eau perdue par évapotranspiration en fonction (1) de la demande évaporative de l'atmosphère, (2) d'un coefficient cultural (K_c) et (3) d'un coefficient de stress (K_s) (Allen et al., 1998). Ce rapport introduit la notion d'**évapotranspiration de référence** (ET_0), pour caractériser la demande évaporative de l'atmosphère à partir de variables météorologiques (Allen et al., 1998). Cette évapotranspiration de référence, qui remplace les notions plus anciennes d'évapotranspiration potentielle, est définie par l'application du modèle de Penman-Monteith (Équation 1.3) à une culture de référence, gazon cultivé dans des conditions sanitaires et hydriques optimales. En appliquant le coefficient cultural K_c à ET_0 (Équation 1.4), nous définissons l'évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture donnée, cultivée dans des conditions optimales. Le coefficient cultural K_c dépend de l'espèce (et de la variété) de la culture, ainsi que de son stade du développement. Enfin, un coefficient de stress hydrique K_s , fonction de l'humidité du sol dans la zone racinaire, permet de calculer l'évapotranspiration réelle de la culture (ET_a pour *actual evapotranspiration*) à partir de son évapotranspiration maximale ETM (Équation 1.5).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1.3)$$

$$ETM = K_c . ET_0 \quad (1.4)$$

$$ET_a = K_s . ETM \quad (1.5)$$

avec :

- ET_0 : évapotranspiration de référence [mm/j]
- R_n : rayonnement net [$MJ.m^{-2}.day^{-1}$], qui est déduit du rayonnement solaire incident
- G : flux de chaleur dans le sol [$MJ.m^{-2}.day^{-1}$]
- Δ : pente de la courbe entre la température de l'air et la pression de vapeur à saturation [$kPa.^{\circ}C^{-1}$]
- γ : constante psychrométrique [$kPa.^{\circ}C^{-1}$]
- $(e_s - e_a)$: déficit de pression de vapeur [kPa]
- T : température de l'air à 2 m de hauteur [$^{\circ}C$]
- u_2 : vitesse du vent à 2 m de hauteur [m/s]
- K_c : coefficient cultural
- K_s : coefficient du stress hydrique
- ETM : évapotranspiration maximale [mm/j]
- ET_a : évapotranspiration réelle [mm/j]

L'ouvrage FAO-56 propose une expression des coefficients de l'équation 1.3, permettant d'estimer l'évapotranspiration de référence ET_0 à partir de données météorologiques communément mesurés (rayonnement solaire incident, température et humidité de l'air, vitesse du vent) à pas de temps journalier (ou horaire). Cet ouvrage propose de plus des valeurs du coefficient cultural K_c pour une large gamme d'espèces cultivées, ainsi que des temps thermiques (degrés-jours) déterminant la durée des phases du coefficient cultural K_c pour ces espèces. Il propose enfin une formulation du coefficient de stress hydrique K_s en fonction du niveau de remplissage du réservoir utile du sol.

3.3.2. Échelle spatio-temporelle des processus hydrologiques

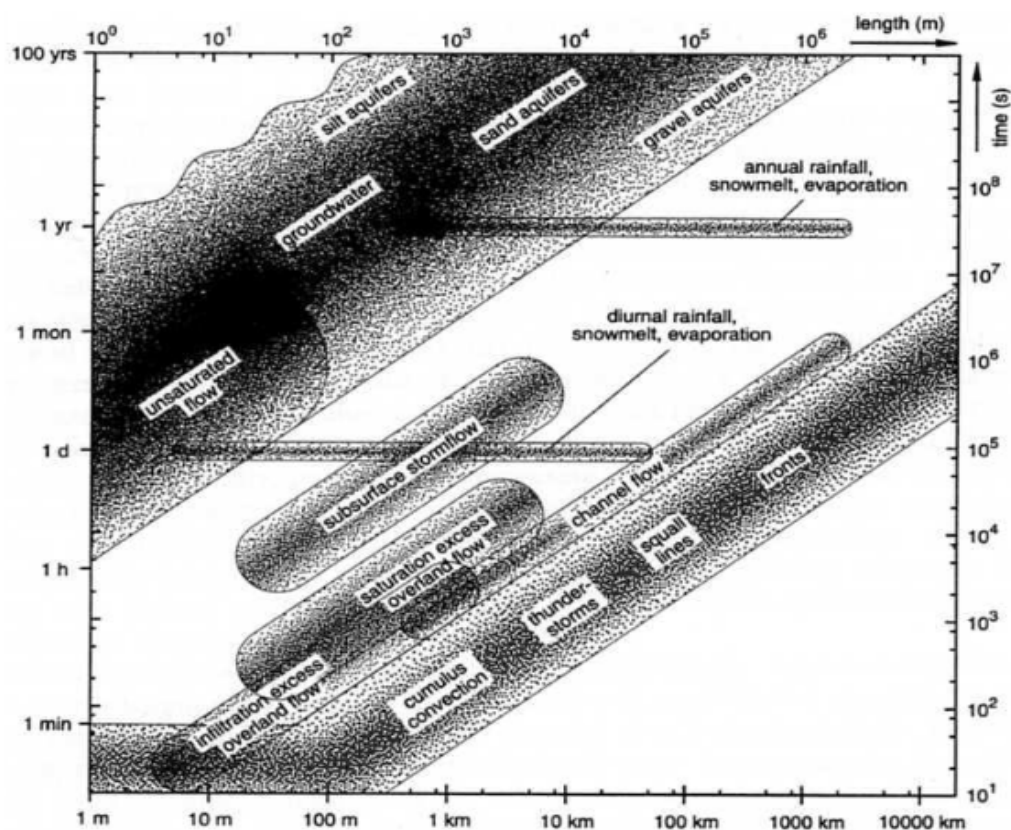


Figure 1.6 : Échelle spatio-temporelle des processus hydrologiques (Blöschl and Sivapalan, 1995).

En hydrologie, il existe une étroite relation entre l'échelle spatio-temporelle et les processus hydrologiques dominants qu'on observe. Le déclenchement des différents processus, suite à un événement pluvieux, se fait avec un certain décalage dans le temps, avec généralement des écoulements surfaciques plus rapides que les écoulements sub-surfaciques. À titre d'exemple, le ruissellement de surface est un processus qui se déroule à une échelle temporelle très fine allant de la minute à l'heure, associé à une échelle spatiale ne dépassant pas quelques kilomètres. Les écoulements sub-surfaciques quant à eux sont des processus observés à des échelles temporelles (allant de l'heure à plusieurs jours) et spatiales plus grandes. Un autre exemple caractéristique du lien entre résolutions spatiale et temporelle des processus hydrologiques est la circulation et l'évolution des stocks d'eau souterraine, dont la dynamique temporelle est très lente, pouvant atteindre quelques dizaines d'années, et l'échelle spatiale très grande, correspondant à celle de la région. La Figure 1.6 présente la relation espace-temps pour quelques processus hydrologiques.

3.3.3. Relations entre cycle de l'eau et cycle de végétation

Le cycle de l'eau et le cycle de la culture sont deux cycles complexes, dépendant l'un de l'autre (Figure 1.7). D'une part, le fonctionnement de la plante dépend de la quantité d'eau disponible dans le sol. Cette dernière est conditionnée par (1) les quantités d'eau de pluie infiltrées dans le sol, (2) la redistribution spatio-temporelle des eaux de pluie via le ruissellement, (3) la quantité d'eau consommée par les plantes par transpiration et (4) les pertes d'eau par évaporation à la surface du sol. D'autre part, le partage infiltration-ruissellement dépend à la fois de la nature du sol et de la végétation. Le sol influence le partage infiltration-ruissellement à la fois par la quantité d'eau de ses horizons de surface et par son état de surface (Corbane et al., 2008). La végétation conditionne aussi le partage infiltration-ruissellement en influençant l'humidité de surface du sol, la cinétique de la pluie au niveau du sol et son impact sur l'état de la surface (la présence de végétation diminue la probabilité de création de croûtes imperméables). L'humidité de surface du sol est influencée par (1) la quantité d'eau de pluie interceptée par le couvert végétal, (2) la quantité d'eau perdue par évaporation à la surface du sol et (3) la quantité d'eau extraite par le système racinaire et perdue par transpiration.

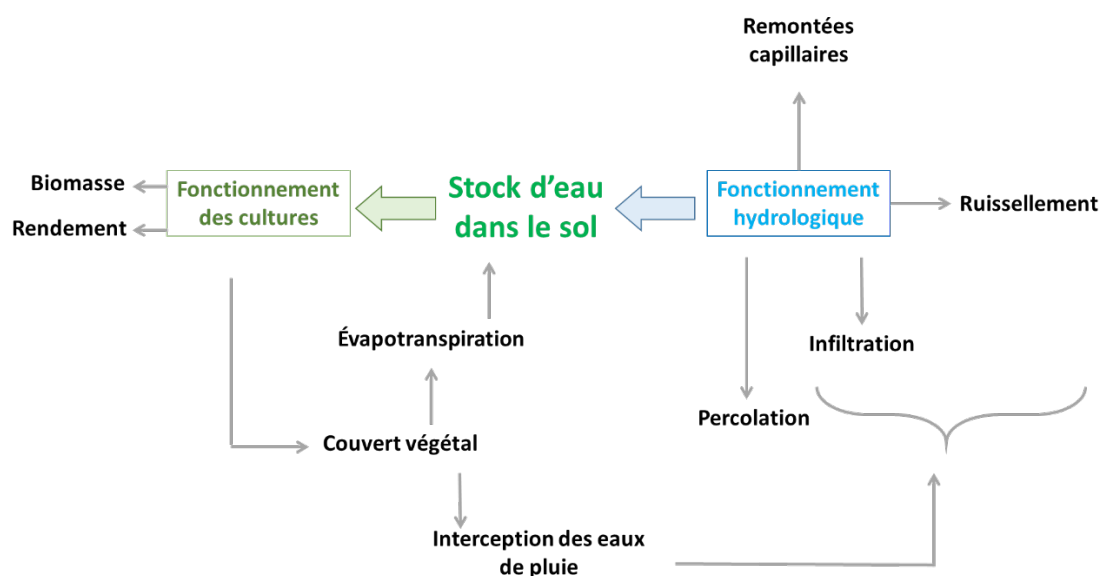


Figure 1.7 : Relations entre cycle de l'eau et cycle de la végétation.

Au sein du bassin versant, la relation entre les deux cycles passe, entre autres, par les transferts latéraux d'eau (ruissellement de surface et écoulements sub-surface) via la connectivité hydrologique entre les parcelles. La connectivité est un terme beaucoup utilisé, non seulement en hydrologie mais aussi en écologie (Ali et Roy, 2009). La notion de la connectivité hydrologique est très large et aucune définition exacte n'est proposée dans la littérature (Ali et

al., 2018). Selon l'objectif de l'étude, la définition de la connectivité hydrologique peut être basée sur (1) les composantes du cycle de l'eau, (2) les caractéristiques du bassin versant, ou (3) les processus d'écoulement. Ali et Roy (2009) présentent et discutent les différentes définitions proposées dans la littérature. À titre d'exemple, Tetzlaff et al. (2007) définissent la connectivité comme les flux de matière et d'énergie (eau, sédiments, graines, nutriments) entre les différentes composantes du bassin versant. Okin et al. (2015) considèrent que les différentes unités spatiales d'un bassin versant sont connectées les unes aux autres par les processus de transport de la matière (ruissellement de surface) et échangent entre elles de la matière (e.g., eau, sédiments, nutriments). Cette définition peut expliquer l'émergence, dans la littérature, des termes tels que « connectivité des sédiments », « connectivité des nutriments », « connectivité chimique » et « connectivité biogéochimique » (Ali et al., 2018). Une autre classification de la connectivité hydrologique existe, divisant celles-ci en connectivité structurale, décrivant comment les unités spatiales d'un bassin versant sont connectées entre elles (Ibrahim, 2005), et connectivité fonctionnelle, décrivant les interactions entre les composantes du bassin versant (e.g., sol, végétation) et les processus hydrologiques (Ibrahim, 2005 ; Turnbull et al., 2008).

La caractérisation de la connectivité peut être faite de différentes manières (Okin et al., 2015), selon la façon dont nous la définissons. À titre d'exemple, Mayor et al. (2008) ont défini la connectivité structurale par un indice qui calcule la longueur du flux (*flow length*), tout en considérant l'effet de la végétation et de la topographie. La longueur du flux est considérée comme étant la longueur moyenne de tous les chemins de ruissellement observés au sein du bassin versant.

Au sein du bassin versant, la connectivité hydrologique affecte, notamment par la redistribution spatiale des eaux de ruissellement (Saco et al., 2020), plusieurs processus biophysiques tels que le transport des solutés et des contaminants jusqu'au réseau hydrographique (Zuecco et al., 2019). Pour cette raison, plusieurs chercheurs la considèrent comme étant une métrique d'évaluation du fonctionnement et de la durabilité du bassin versant (Ali et Roy, 2009 ; Saco et al., 2018). La connectivité hydrologique a fait l'objet de plusieurs études hydrologiques pour mieux comprendre le fonctionnement du bassin versant (Ameli et Creed, 2017 ; Rinderer et al., 2018 ; Nanda et al., 2019). Étant donné que la redistribution spatiale des eaux de ruissellement dépend principalement des caractéristiques du bassin versant (topographie, végétation, état de surface du sol) (Saco et al., 2020), une dégradation de ces caractéristiques, par une mauvaise gestion du bassin versant, peut augmenter la connectivité, en augmentant le ruissellement et le

transport des sédiments par érosion hydrique. L'étude de la connectivité hydrologique peut donc fournir des indicateurs d'avertissement concernant les états des bassins versants, notamment en régions semi-aride et aride où le ruissellement de surface est la principale source des écoulements dans la rivière (Mayor et al., 2008; Moreno-de las Heras et al., 2012; Okin et al., 2015).

Pour la suite de ce manuscrit, nous adoptons la définition donnée par Tetzlaff et al. (2007) pour définir la connectivité hydrologique entre les parcelles.

À retenir

- Le bassin versant est considéré comme l'unité de gestion des ressources, notamment des ressources en eau douce.
- La plante est en interaction continue avec son environnement (sol et atmosphère).
- Il existe une interdépendance forte entre le cycle de l'eau et celui de la végétation.
- Les processus hydrologiques et agronomiques présentent des échelles spatio-temporelles différentes.
- Au sein du bassin versant, les interactions entre le cycle de l'eau et le cycle de la végétation passent, entre autres, par les transferts d'eau latéraux via la connectivité hydrologique entre les parcelles/unités du bassin versant.

4. Leviers d'action pour gérer durablement l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire

L'agriculture durable peut être définie par une stabilité sociale, économique et par une durabilité environnementale (Smith et al., 2017). Pour concevoir de nouveaux modes de gestion agricole durables, les différents secteurs impliqués ne peuvent pas agir de manière individuelle ou indépendamment les uns des autres. Nous abordons cette problématique en supposant que les systèmes de production agricole actuels peuvent être améliorés, et non qu'ils doivent être transformés. Il convient cependant de mentionner l'émergence, dans la littérature internationale, de recommandations relatives à la transformation des systèmes de production en lien avec des changements d'habitudes alimentaires (Willett et al., 2019).

Pour améliorer les systèmes de production actuels, des solutions de nature agronomique et hydrologique existent. Ces solutions peuvent être abordées à différentes échelles spatiales, allant de la parcelle au territoire. Les acteurs impliqués diffèrent d'une échelle à une autre

(Dalgaard et al., 2003 ; Rizzo et al., 2013 ; Papy, 2022). À l'échelle de la parcelle, les actions envisageables impliquent les agriculteurs dans le but d'adapter leurs pratiques agricoles au contexte agro-pédo-climatique et socio-technique, tandis qu'à l'échelle du bassin versant, les actions menées par les aménageurs ont comme but l'aménagement et la protection des bassins versants agricoles. À des échelles plus grandes comme celle du territoire, c'est plutôt dans le cadre de la planification et de l'application des agendas politiques que les actions des administrateurs s'inscrivent. La Figure 1.8 résume la nature des actions ainsi que les acteurs impliqués à chaque résolution spatiale.

Étant donné que nous nous intéressons ici à l'étude des processus agro-hydrologiques au sein du bassin versant, et que ce dernier est considéré comme étant le territoire de référence pour la gestion des eaux douces (Petit, 2020), nous ne discutons dans ce qui suit que des leviers d'action en relation avec l'eau et les pratiques culturales. Les actions ayant une dimension socio-politico-économique, mises en place sur des échelles spatiales très grandes, ne seront pas abordées dans cette étude. Il est aussi important de mentionner que toutes les solutions discutées ici s'appuient sur les processus décrits précédemment dans la section 3.

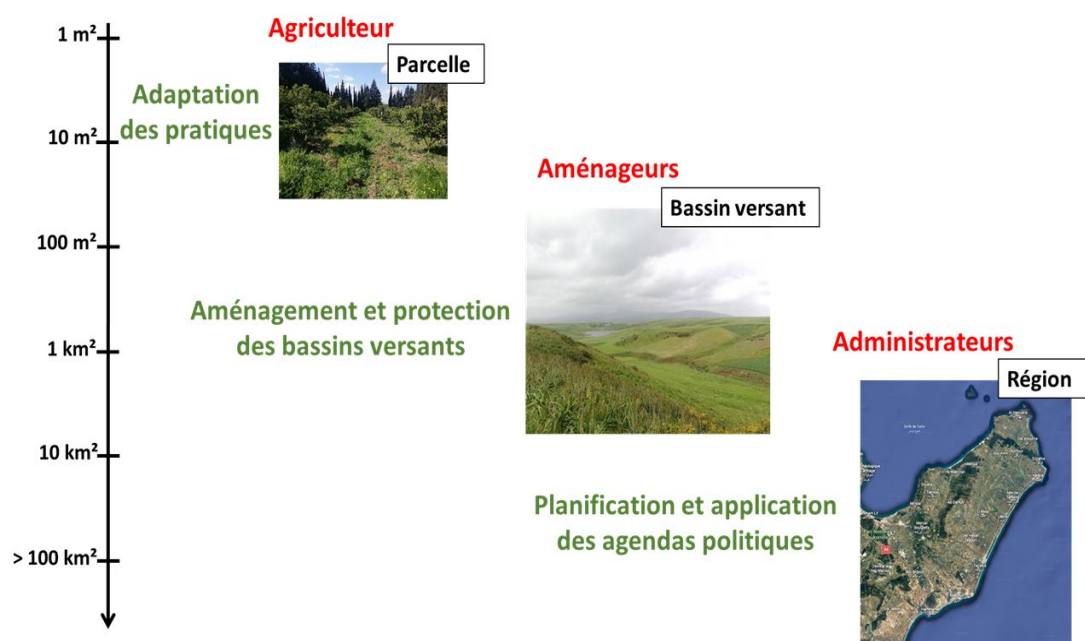


Figure 1.8 : Différentes échelles spatiales de gestion du système agricole.

4.1. Actions de nature agronomique

Par son interaction avec son milieu, la plante peut avoir des effets sur le sol, le cycle hydrologique, l'érosion du sol et la qualité des eaux.

Effet sur le sol : la végétation affecte les propriétés physiques du sol telles que sa structure et son aération grâce à l'architecture de son système racinaire. Plus le système racinaire est dense et profond, plus les macropores sont importants, augmentant ainsi la quantité d'eau infiltrée dans la zone racinaire (Pirastru et al., 2017), et par conséquent la quantité d'eau disponible pour la transpiration et la production de la biomasse. La végétation améliore aussi la teneur en matière organique du sol en produisant de la biomasse (résidus), source de matière organique, nécessaire à l'activité biologique du sol (Reeves, 1994 ; Gura et Mnkeni, 2019). Elle permet aussi l'augmentation de la teneur en carbone et en azote du sol (e.g., légumineuses, plantes fixatrices d'azote).

Effet sur les processus hydrologiques : la végétation influence le cycle hydrologique en modifiant les propriétés hydrodynamiques du sol, la capacité d'infiltration, la transpiration et l'évaporation ainsi que le ruissellement (Stroosnijder et al., 2012 ; Kim et al., 2013 ; Mekki et al., 2018b). Plus le couvert végétal est dense, plus l'interception des eaux de pluie est importante (Muñoz-Villers et McDonnell, 2013), permettant une réduction du ruissellement (Nugroho et al., 2013 ; Yan et al., 2018) et une augmentation de la quantité d'eau infiltrée. L'augmentation de l'infiltration augmente l'humidité du sol et donc la transpiration (Yan et al., 2018), améliorant ainsi la production de la culture. La végétation permet aussi la réduction de l'évaporation du sol en limitant le rayonnement incident à la surface du sol.

Effet sur l'érosion hydrique du sol : la végétation diminue l'érosion hydrique en fixant le sol avec son système racinaire et en réduisant la cinétique du ruissellement, ainsi que l'effet « splash » des gouttes de pluie (Reeves, 1994).

Effet sur la qualité des eaux : la végétation peut améliorer la qualité des eaux souterraines et des eaux de rivière en diminuant le lessivage de l'azote vers l'aquifère et les pertes du phosphore dans les eaux de ruissellement (Reeves, 1994).

Plusieurs techniques existent pour profiter de l'effet de la végétation sur son milieu afin d'améliorer la production agricole et préserver les ressources en eau et en sol. Parmi ces techniques, nous citons :

- la cultures couvrantes : leur mise en place permet d'éviter le sol nu et donc de réduire le ruissellement et l'érosion du sol ;

- les cultures intercalaires⁴ : introduction de bandes enherbées de cultures annuelles entre les lignes d'arbres ;
- la rotation culturale : il s'agit de l'organisation temporelle des cultures. À titre d'exemple, l'introduction de cultures peu consommatrices d'eau dans le cycle de la rotation permet de conserver la quantité d'eau disponible dans la zone racinaire, pour les cultures du cycle suivant (Sainju et al., 2011) et donc augmenter leur production (Franco et al., 2018 ; Hatfield et Dold, 2019). Mekki et al. (2018b) ont par exemple mesuré un profil d'eau maximal moyen plus important sous culture de pois chiche que sous les parcours (parcours herbacés à base de végétation annuelle et parcours ligneux). La rotation culturale permet aussi l'augmentation de la quantité d'azote dans le sol pour les cultures du cycle suivant en cultivant des plantes fixatrices d'azote (légumineuses), ce qui permet de réduire l'utilisation des engrais azotés.

En plus les techniques mettant en œuvre l'effet de la végétation sur les différentes composantes du milieu (sol, cycle de l'eau), il existe d'autres techniques permettant l'amélioration de la production et la préservation des ressources. Nous décrivons ci-dessous plusieurs de ces techniques.

La gestion du labour : diminuer le labour, voir le supprimer (Benaouda et al., 2015) est l'une des techniques pour préserver les propriétés physiques et biochimiques du sol et lutter contre l'érosion. Cette réduction du labour permet : (1) la réduction de la cinétique du ruissellement grâce aux résidus laissés sur le sol (Skaalsveen et al., 2019) ; (2) la réduction de la perturbation du sol et donc la préservation de la stabilité de sa structure, ce qui le rend plus résistant à l'érosion (Skaalsveen et al., 2019) ; (3) la préservation de la structure du sol et donc des agrégats, nécessaire pour la protection de la matière organique (Dong et al., 2017) ; et (4) la diminution de l'oxydation de la matière organique (Dong et al., 2017) en limitant l'aération du sol.

Cependant, le travail du sol avant la saison de semis est très important pour favoriser l'infiltration des eaux de pluie et donc l'augmentation de l'eau dans le sol disponible pour la plante, en particulier pendant la première phase du cycle de développement. Le travail du sol permet aussi de limiter la présence des plantes adventices, consommatrices d'eau et de nutriments.

⁴ Système intercalaire : alternance de deux ou plusieurs cultures dans un même champ au même moment (FAO, 2016).

Date de semis : la hausse des températures peut altérer le rendement des cultures à cause de cycles phénologiques plus courts et à cause de l'exposition à des périodes de stress hydrique plus longues. La réduction de la phase de croissance et de la phase reproductive entraîne une réduction de la quantité de lumière interceptée, nécessaire à la photosynthèse, et ainsi une réduction de la biomasse aérienne sèche et du rendement. Le choix d'une date de semis optimale est donc une solution pour (1) éviter un échec de la germination dû à un stress hydrique au début du cycle, (2) adapter le cycle cultural à la distribution temporelle des pluies et (3) éviter les périodes de stress hydrique ou thermique intenses (Hatfield et al., 2011). Traditionnellement, chaque région est caractérisée par une période durant laquelle les semis sont faits. Lhomme et al. (2012) recommandent alors de semer pendant cette période en respectant deux principaux critères (Biazin et Stroosnijder, 2012 ; Soddu et al., 2013 ; Muluneh, 2020) :

- un cumul de pluie de 20 mm au minimum après cinq jours consécutifs de pluie (Soddu et al., 2013) ;
- une période sèche⁵ n'excédant pas 15 jours dans les 30 jours qui suivent le semis.

En conditions de climat futur, Lhomme et al. (2009) conseillent d'appliquer cette recommandation, tout en allongeant la période de semis requise dans la région.

Agroforesterie : il s'agit de l'association d'arbres et de cultures annuelles et/ou de fourrages sur une même parcelle. Ce système offre de nombreux services écosystémiques (Dupraz et Liagre, 2008) en lien avec la stabilisation des sols, l'enrichissement des sols en matières organiques, la séquestration du carbone par les arbres (Hamon et al., 2009) et le retour de la biodiversité, en offrant de nouveaux habitats (Salazar, 2021). La stabilisation des sols par l'agroforesterie se manifeste principalement par : (1) la stabilisation des sols grâce au système racinaire profond des arbres ; (2) la protection contre l'érosion éolienne du sol en réduisant la vitesse du vent par les arbres (Salazar, 2021) ; et (3) la protection contre l'érosion hydrique du sol grâce aux bandes enherbées (même principe que les cultures couvrantes). L'agroforesterie améliore aussi la qualité du sol en lui fournissant de la matière organique (nécessaire au fonctionnement des organismes du sol) via les débris des végétaux (chute de feuilles et branches mortes) et la décomposition racinaire. De plus, grâce à leurs systèmes racinaires profonds, les arbres mettent

⁵Pendant la saison pluvieuse, une période sèche est définie comme étant une période continue sans pluie ayant lieu après le semis (Muluneh et al., 2015).

des nutriments à dispositions des cultures associées, en remontant les cations issus de l'altération de la roche mère (Cadisch et al., 2004).

Toutes ces solutions peuvent être adoptées, ensemble ou de manière alternée, à la fois dans l'espace et dans le temps. À titre d'exemple, plusieurs études se sont intéressées à l'impact de l'association de la suppression du labour et de la rotation culturale sur la teneur en matière organique. Gura et Mnkeni (2019) ont rapporté une amélioration de la teneur en matière organique du sol et de la teneur en azote grâce aux résidus laissés au sol.

L'application de ces techniques ne doit pas être faite uniquement à l'échelle de la parcelle, même si celle-ci constitue la première unité spatiale de gestion des processus agro-hydrologiques (Papy, 2022). En effet, l'application de ces techniques s'inscrit dans un cadre de gestion à des échelles spatiales plus grandes, comme celle du bassin versant. L'agriculteur ne peut choisir de manière individuelle, sans prendre en compte les conditions de son environnement. Le choix des cultures ainsi que des pratiques agricoles (labour, date de semis) dépendent énormément de l'activité du collectif, et ce pour plusieurs raisons (Papy, 2022) :

- les ressources naturelles, notamment les ressources en eau, sont des biens communs qu'il faut gérer à l'échelle du bassin versant pour un partage équitable et durable ;
- l'allocation des sols dépend de la nature du terrain (texture et profondeur du sol, pente) et des aménagements (irrigation, drainage, distance avec les bâtiments). De ce fait, le choix de la culture ainsi que l'organisation du travail doivent prendre en compte toutes ces contraintes. À titre d'exemple, dans un terrain accidenté se trouvant en haut de pente, la mise en place de fourrages ou parcours est plutôt recommandée. De plus, les agriculteurs se trouvent parfois obligés de s'organiser entre voisins et cultivent alors la même culture afin de mutualiser le matériel agricole au moment du travail du sol et de la récolte, d'une manière mécanisée (Mekki et al., 2018a).

4.2. Actions de nature hydrologique

Comme discuté dans la section 1.1.3, l'agriculture méditerranéenne bénéficie d'un héritage important de savoir-faire techniques, développés par les générations anciennes pour s'adapter aux conditions naturelles particulières de la région. Ces savoir-faire consistent en grande partie en techniques de collecte et de conservation des eaux de pluie (CES) (Albergel et al., 2004; Habaieb et al., 2014; Yadari et al., 2019).

Au niveau de la parcelle, ces techniques consistent principalement à concentrer les eaux de pluie, les eaux de ruissellement venant de l'amont, ainsi que les sédiments transportés par

érosion hydrique du sol, dans des micro-bassins. Ceci permet (1) l'augmentation de l'humidité dans la zone racinaire (infiltration forcée des eaux de pluie et de ruissellement) ; (2) l'amélioration de la fertilité du sol, grâce aux nutriments transportés par les eaux de ruissellement et (3) la réduction de l'érosion hydrique du sol. Parmi ces techniques, nous pouvons citer les demi-lune et les zaïs (Yadari et al., 2019) (Figure 1.9).



Figure 1.9 : Technique de conservation des eaux et des sols, exemple des demi-lunes à gauche et de zaïs à droite.

À l'échelle du bassin versant, d'autres techniques de CES existent telles que les Jousour qui consistent à aménager l'oued en séries de terrasses qui seront cultivées. La construction de lacs collinaires à l'exutoire des bassins versants permet aussi (1) de protéger les grands barrages situés à l'aval contre le dépôt des sédiments, par érosion hydrique, (2) de développer l'agriculture irriguée et (3) de servir de source d'apport d'eau complémentaire à l'agriculture pluviale, quand la période de sécheresse se produit pendant une période critique ou quand elle est trop longue (FAO, 2020).

À retenir

L'occupation du sol joue un rôle important dans le fonctionnement du bassin versant en influençant de nombreux processus biophysiques, tels que le cycle de l'eau, les propriétés physico-chimiques du sol, l'érosion et la qualité des eaux. L'exploration de l'organisation spatio-temporelle des cultures semble donc être une solution prometteuse pour assurer une gestion durable des ressources naturelles (Mehdi et al., 2015), notamment les ressources en eau et en sol, et ainsi améliorer la production agricole, particulièrement dans un contexte de changement climatique.

5. Efficience agronomique de l'eau : une métrique de gestion de l'eau agricole

En régions semi-arides et arides, l'eau est considérée comme le principal facteur limitant la production de l'agriculture pluviale (Daccache et al., 2016) puisque la croissance et le développement des cultures sont étroitement liés à la pluviométrie. Pour préserver la production agricole et assurer la sécurité alimentaire des populations dans ces milieux, il est important d'optimiser la production végétale par unité d'eau consommée, c'est-à-dire d'augmenter l'efficience agronomique de l'eau (notée WUE pour *water use efficiency*) (Oweis et al., 2000 ; Ali et Talukder, 2008). Pour cette raison, l'efficience agronomique de l'eau nous semble être la meilleure métrique (Leakey et al., 2019) pour évaluer la performance d'un système agricole, en particulier en milieu aride et semi-aride, puisqu'elle relie la production végétale à la quantité d'eau utilisée.

5.1. Définition

L'efficience agronomique de l'eau relie l'eau utilisée par la plante à sa production. Elle est donc exprimée comme le rapport entre la biomasse accumulée et la quantité d'eau consommée. Selon l'objectif et l'échelle spatiale de l'étude, ce rapport peut être exprimé de différentes manières (Sinclair et al., 1984 ; Vadez et al., 2023). La biomasse accumulée peut être représentée par la biomasse aérienne sèche (notée AGB pour *aboveground biomass*), le rendement (noté Yld pour *yield*) ou même la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) assimilé par la plante. La quantité d'eau consommée peut être représentée par la transpiration végétale (Tr), l'évapotranspiration réelle (ET_a), qui inclut Tr et l'évaporation du sol (Es), ou encore comme la quantité d'eau totale introduite dans le système (pluie ou pluie et irrigation). L'échelle spatiale et temporelle de la WUE peut changer selon l'objectif de l'étude et la manière avec laquelle la WUE est exprimée. Il est donc possible de calculer la WUE à l'échelle (1) de l'organe de la plante dans des études éco-physiologiques fines, (2) de la plante pour prendre en compte l'effet des interactions de la culture avec son environnement, (3) de la parcelle en considérant l'effet des pratiques agricoles sur l'utilisation de l'eau par la culture et (4) du bassin versant agricole en quantifiant la WUE par rapport au transfert de l'eau au sein du bassin versant. La WUE peut être exprimée à un pas de temps infra-horaire (instantané), journalier ou même saisonnier (Sinclair et al., 1984). Le Tableau 1.1 résume les différentes expressions de la WUE.

Tableau 1.1 : Récapitulatif des différentes expressions de l'efficience de l'eau (WUE)

Équation	Échelle spatiale
$WUE = \frac{CO_2 \text{ assimilé}}{\text{Transpiration}}$	Feuille
$WUE = \frac{\text{Biomasse}}{\text{Transpiration}}$	Plante
$WUE = \frac{\text{Rendement ; Biomasse}}{\text{Irrigation + Pluie}}$	Parcelle
$WUE = \frac{\text{rendement}}{ETa}$	Parcelle
$WUE = \frac{\text{Biomasse ; Rendement ; GPP ; NPP}}{\text{Irrigation + Pluie}}$	Bassin versant

Dietzel et al. (2016) proposent une nouvelle formulation de la WUE, basée non seulement sur la quantité d'eau perdue par la plante sous forme d'évapotranspiration, mais aussi sur les quantités d'eau perdues par ruissellement et percolation. Selon ces auteurs, cette manière d'exprimer la WUE permet d'évaluer l'efficience de l'eau à l'échelle du système (sWUE), et non pas à l'échelle physiologique de la plante comme c'est le cas avec la WUE. De cette manière, sWUE permet d'évaluer l'efficience de l'eau 1) en conditions de stress hydrique caractérisées par une baisse de productivité, et 2) en conditions humides caractérisées par une productivité maximale mais des pertes d'eau importantes par ruissellement et percolation.

5.2. Facteurs d'influence

5.2.1. Nature de la culture

L'efficience agronomique de l'eau est différente d'une espèce à l'autre, et d'une variété à l'autre pour une même espèce. Ceci est dû aux différences morphologiques entre les cultures et variétés, et qui influencent la transpiration et la quantité d'eau absorbée par le système racinaire (Singh et al., 2014). Plus le système racinaire de la plante est dense et profond, plus la quantité d'eau disponible pour la plante est importante (Farooq et al., 2019 ; Sinclair et al., 1984). D'autre part, cette différence de WUE entre les espèces et les variétés est aussi due aux différences physiologiques marquées par des activités photosynthétiques différentes. Ali et Talukder, (2008) ; Mbava et al. (2020) ont montré que les cultures en C4 présentent une WUE plus importante que celle des cultures en C3, à cause d'une activité stomatique différente entre

ces types de cultures. Pour les plantes en C3, Mbava et al. (2020) ont montré que les céréales présentent une WUE plus importante que celle des oléagineuses et des légumineuses.

5.2.2. Le climat et la quantité d'eau appliquée au système

Les deux tiers de la variation de la WUE peuvent être expliqués par des facteurs climatiques tels que la température, les précipitations et le rayonnement solaire (Neenu et al., 2013). L'effet de variations des conditions climatiques sur la WUE dépend du facteur climatique considéré, de la période à laquelle cette variation a eu lieu, et de la culture elle-même.

D'une manière générale, une augmentation des températures de l'air impacte négativement la productivité végétale et donc la WUE. En effet, la température de l'air influence la WUE en agissant à la fois sur l'évapotranspiration et le développement de la plante. Des fortes températures augmentent l'évapotranspiration (Singh et al., 2014). Elles influencent aussi la production végétale en réduisant le cycle de la culture (cycles cultureux plus court). Cette réduction de la durée du cycle, engendrée par l'augmentation de la température, se traduit par une accélération de la vitesse de croissance et de développement de la plante, induisant ainsi des plantes plus petites, une phase reproductive plus courte et un rendement potentiel réduit dû à la réduction de la quantité de lumière interceptée (Hatfield et al., 2011). La réponse de la culture aux variations de température dépend de la variété et de la phase phénologique durant laquelle la hausse de température se produit. Hatfield et al. (2011) ont mentionné que la phase reproductive est la phase la plus sensible du cycle végétal, avec des températures optimales plus faibles que celles de la phase végétative.

Le rayonnement solaire et la concentration de CO₂ atmosphérique influencent tous deux la photosynthèse des plantes, affectant ainsi leur production et donc leur WUE. Hatfield et al. (2011) et Yang et al. (2015) ont montré qu'une augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique, dans un contexte de changement climatique, aura un effet positif sur la WUE. L'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique influence la productivité des plantes en augmentant leur photosynthèse. À titre d'exemple, un doublement de la concentration de CO₂ atmosphérique actuel peut augmenter de 50% à 60% la WUE du blé. Cependant, cet effet positif de l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique peut être atténué par l'augmentation d'autres facteurs climatiques, notamment la température de l'air (Olesen et Bindi, 2002 ; Hatfield et al., 2011; Yang et al., 2015), et à plus long terme par des phénomènes d'acclimatation des plantes, notamment pour les plantes pérennes.

Selon les périodes, le rendement des cultures est très sensible à la quantité d'eau entrant dans le système, que ce soit par la pluie ou par l'irrigation. L'effet de l'eau sur la productivité végétale peut être positif ou négatif selon qu'il s'agisse de sécheresse ou de l'excès d'eau (Ali et Talukder, 2008 ; Mbava et al., 2020). Cela dépend d'une part de la culture et ses capacités de résistance à la sécheresse ou à l'excès d'eau, et d'autre part de la phase du cycle cultural à laquelle le stress hydrique ou l'excès d'eau a lieu.

5.2.3. Les conditions édaphiques

Le sol joue un rôle important sur la production des cultures et donc sur leur WUE. Les caractéristiques du sol influencent la WUE de différentes manières en conditionnant les quantités d'eau et de nutriments disponibles pour la plante. La texture et la profondeur de la zone racinaire déterminent le réservoir utile du sol et donc l'eau disponible pour la plante (Singh et al., 2014 ; Mbava et al., 2020). Le développement racinaire est aussi conditionné par la profondeur du sol. Les teneurs en matière organique et en nutriments du sol influencent la croissance des plantes et donc leur production et leur WUE (Mojid et al., 2012 ; Mbava et al., 2020).

5.2.4. Les pratiques culturales

Les pratiques culturales jouent un rôle important sur les variations de la WUE. La fertilisation, notamment l'application de l'azote, permet le développement d'une couverture végétale plus dense et plus précoce, limitant ainsi les pertes d'eau par évaporation (Farooq et al., 2019). La date de semis peut aussi influencer la WUE. Une date de semis optimale doit permettre une optimisation de la durée de la croissance et de la quantité de rayonnement solaire interceptée tout en évitant l'échec à la germination dû à un manque d'eau au début du cycle (Oweis et al., 2000 ; Laux et al., 2010 ; Waongo et al., 2015 ; Farooq et al., 2019). La mise en place de techniques de conservation en eau des sols (*water harvesting*) améliore la WUE à l'échelle de la parcelle et du bassin versant, en limitant les pertes d'eau par ruissellement et en augmentant ainsi la quantité d'eau infiltrée dans le sol. Une bonne gestion des cultures et du sol participe à l'amélioration de la WUE (Fengrui et al., 2000; Rockström et Barron, 2007; Singh et al., 2014). Par exemple, le labour améliore la capacité d'absorption d'eau par la plante en augmentant la quantité d'eau infiltrée dans la zone racinaire, grâce à l'amélioration de la porosité du sol. Aussi, une rotation culturale incluant des légumineuses augmente la quantité d'azote dans le sol, permettant ainsi une productivité plus importante.

À retenir

L'efficacité agronomique de l'eau (WUE) représente une variable intégratrice reliant les processus biologiques (photosynthèse) et physiques (transpiration et évaporation) de la plante (Yang et al., 2015 ; Guo et al., 2019 ; Hatfield and Dold, 2019). Une meilleure compréhension de cette variable permet donc de mieux appréhender la réponse de la productivité agricole face aux changements environnementaux (Hatfield et Dold, 2019), et ainsi de mieux gérer les ressources en eau dans les paysages agricoles, en adoptant des actions appropriées (Rockström et Barron, 2007; Yanmathg et al., 2015) pour une amélioration de la productivité agricole tout en préservant les ressources naturelles.

6. Expérimentation ou modélisation : quels outils d'aide à la gestion de l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire ?

L'étude des bassins versants agricoles dans un contexte de ressources en eau limitées peut avoir au moins deux objectifs complémentaires : (1) mieux connaître et comprendre leur fonctionnements agronomique et hydrologique et (2) explorer différentes solutions d'adaptation aux différentes pressions anthropiques et climatiques afin de trouver celles permettant d'assurer la durabilité de ces territoires. L'analyse de la littérature montre que plusieurs approches peuvent être mises en œuvre pour répondre à ces deux objectifs.

Un état de l'art est proposé ci-dessous, en vue de recenser les différents types d'approches présentes dans la littérature. Deux grandes familles d'approches ont été identifiées : approches basées sur l'expérimentation et approches basées sur la modélisation numérique.

6.1. Approches basées sur l'expérimentation

Cette approche repose sur des résultats d'expérimentations conduites soit en conditions environnementales contrôlées, soit dans le milieu naturel (parcelle, bassin versant), afin de comprendre le fonctionnement agro-hydrologique des bassins versants agricoles.

Les expérimentations en conditions contrôlées : ce sont des expériences menées dans un endroit fermé (e.g., sous serre) permettant le contrôle des facteurs environnementaux (e.g., paramètres climatiques, composition physico-chimique du sol) et l'étude, avec précision, de l'influence d'un seul facteur (Gibson et al., 1999) sur le processus étudié (e.g., croissance végétale, caractéristiques physico-chimiques du sol), tout en maintenant les autres facteurs dans des conditions optimales. Les expérimentations en conditions contrôlées ont beaucoup été

utilisées dans la littérature pour étudier les interactions entre la plante et son environnement, tels que (1) l'effet des stress hydrique (Emam et al., 2010 ; Al-Ajlouni et al., 2016) et thermique (Rahaman et al., 2018) sur la croissance et le développement de la plante, (2) l'effet de la fertilisation (MingJin et al., 2016 ; Zhaoxiang et al., 2020) sur la production végétale, (3) l'effet des cultures sur les propriétés chimiques et l'activité biologique du sol (e.g., teneur en azote, présence de parasites tels que les nématodes) (Alvey et al., 2001 ; Birch et al., 2007 ; Viketoft, 2008).

Malgré le rôle important que joue l'expérimentation en conditions contrôlées dans la compréhension de la relation de la plante avec son milieu, elle reste une représentation approximative de la réalité, ne prenant pas en compte l'effet des interactions entre les différents facteurs sur le processus étudié. De ce fait, les expérimentations en plein champ sont beaucoup plus réalistes.

Les expérimentations en plein champ : ce sont des expérimentations qui ont pour but d'étudier et de décrire les processus agronomiques et hydrologiques, ainsi que leurs interactions dans des conditions environnementales réelles, et ce à différentes échelles spatiales (locale ou multi-locale) et temporelles (expérimentation sur une ou sur plusieurs années). Les expérimentations en plein champ peuvent être menées sans ou avec intervention de l'homme sur les facteurs environnementaux. Le but est donc d'observer, d'analyser et de comprendre le l'évolution des cycles de l'eau et de la végétation face aux différents facteurs du milieu naturel, et ce dans des conditions climatiques actuelles. Par exemple, Mekki et al. (2014) ont analysé l'effet du type de cultures (espèces) sur le bilan hydrique du sol dans un contexte d'agriculture pluviale méditerranéenne. Leurs résultats montrent que le stock d'eau dans le sol est principalement influencé par l'évapotranspiration, et est plus important pour les légumineuses que pour les céréales.

Il est aussi possible de mener ces expérimentations en modifiant un ou plusieurs facteurs environnementaux (e.g., paramètres climatiques). L'objectif de ces expériences est donc d'étudier et d'analyser l'effet des facteurs modifiés sur le fonctionnement de la culture. Parmi ces expérimentations, nous pouvons citer les expérimentations FACE (*Free Air CO₂ Enrichment*) qui ont pour but d'étudier et de décrire le comportement des plantes (photosynthèse, croissance, développement de la biomasse, rendement) face à une augmentation importante de la concentration de CO₂ atmosphérique (Ainsworth et Long, 2004). L'approche FACE est plus réaliste que les expériences menées en sous serre (Ainsworth et al.,

2008) : contrairement aux expériences menées sous serre, les expérimentations FACE sont menées en plein champ, en ajustant artificiellement les concentrations de CO₂ atmosphérique tout en préservant, d'une manière naturelle ou artificielle, les autres composantes du milieu (température, précipitations, sol). La concentration en CO₂ atmosphérique est ajustée grâce à un système de tuyaux placés, d'une manière circulaire, autour de la parcelle étudiée et émettant du CO₂ (McLeod et Long, 1999).

L'expérimentation en plein champ est la technique d'étude du fonctionnement des cultures la plus directe et la plus réaliste. Cependant, elle présente plusieurs limites liées à son coût matériel et humain, son étendue spatiale et sa généricité. L'expérimentation en plein champ est une approche très coûteuse en moyens matériels et humains. Elle est généralement réalisée à l'échelle locale (parcelle) ou multi-locale (plusieurs parcelles). Très peu d'expérimentations de ce type permettent de prendre en compte le lien entre l'eau et la culture sur de plus grandes étendues (bassin versant). De plus, avec ce type d'approche, il est difficile de croiser plusieurs facteurs d'influence et d'étudier leurs effets sur le fonctionnement agro-hydrologique des bassins versants.

6.2. Approches basées sur la modélisation numérique

À côté des approches basées sur l'expérimentation, il existe dans la littérature un autre type d'approche permettant l'étude du fonctionnement hydrologique ou agronomique des bassins versants, qui se base sur la modélisation numérique.

Un modèle numérique peut être défini comme étant une représentation numérique d'un système donné (système économique, agricole, etc). L'expérimentation numérique est l'utilisation d'un modèle numérique pour comprendre et prédire, sur la base de simulations, les processus et les interactions entre les différentes composantes dudit système, lorsque l'expérimentation est difficile ou impossible à réaliser. La simulation numérique devient ainsi un outil d'aide à la décision pour la mise en place de nouvelles stratégies de gestion des ressources (Castaneda-Vera et al., 2015).

Depuis le début du 20^{ème} siècle, les modèles numériques n'ont cessé d'évoluer pour passer de simples équations décrivant un processus donné à des systèmes d'équations de plus en plus complexes et complets, représentant les différentes interactions entre les composantes d'un même système, ainsi que les évolutions desdits systèmes (Keating et Thorburn, 2018).

Pour représenter le fonctionnement d'un système donné, il existe une diversité de modèles qui diffèrent les uns des autres par leurs objectifs (variables d'intérêts), par les approches choisies pour la description des différents processus, par leur description de l'objet d'étude, par leur degré de complexité, par le nombre de paramètres d'entrée ainsi que par l'échelle spatio-temporelle considérée (Kersebaum et al., 2007; Angulo et al., 2014). De ce fait, il est difficile de dire qu'un modèle est meilleur qu'un autre. La bonne performance d'un modèle dépend de plusieurs facteurs tels que l'objectif de son utilisation (ce qu'on souhaite simuler et obtenir) et les conditions dans lesquelles le modèle a été validé (climat, type de culture...). De ce fait, le choix d'un modèle pour une étude donnée doit répondre à plusieurs critères, à savoir :

- objectif de l'étude : le modèle choisi doit répondre aux objectifs de recherche (Soltani et Sinclair, 2012) ; il est donc important de bien définir les objectifs de l'étude avant de procéder à la sélection du modèle de culture ;
- généricité : le modèle doit être adapté à un panel de conditions environnementales aussi large que possible ;
- modularité : le modèle doit être structuré en modules séparés et interconnectés ;
- robustesse : selon Soltani et Sinclair (2015), la robustesse d'un modèle peut être définie comme sa capacité à bien représenter la dynamique temporelle de la croissance de la culture et à prédire son rendement final ;
- transparence (Soltani et Sinclair, 2015) : un modèle est transparent lorsque son code, ses paramètres et sa documentation technique sont accessibles et sont facilement compréhensibles par l'utilisateur ;
- complexité et niveau de détails (Brooks et Tobias, 1996 ; Soltani et Sinclair, 2015) : la complexité d'un modèle est liée au nombre d'équations et de paramètres d'entrée nécessaires. Plus le nombre de paramètres d'entrée est faible, plus le modèle est qualifié de simple, et vice-versa ;
- opérationnel : le temps de calcul doit être aussi faible que possible.

À retenir

Compte tenu des limites de l'expérimentation, liées principalement à une échelle spatio-temporelle restreinte (échelle locale ou multi-locale et conditions de climat actuel), la modélisation numérique semble être l'approche la plus adaptée pour étudier le fonctionnement des bassins versants. En effet, la modélisation numérique permet de réaliser des études sur des étendues spatiales importantes (bassin versant) et des longues périodes temporelles (actuelles et futures). Toutefois, il est important de mentionner qu'un minimum de données issues de l'expérimentation in-situ est nécessaire pour calibrer et valider les modèles numériques utilisés.

7. Modélisation agro-hydrologique, outil d'aide à la gestion de l'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire

Dans la littérature, il existe un nombre important de modèles de culture, hydrologiques et agro-hydrologiques. Ces modèles ont comme objectifs :

- d'approfondir les connaissances scientifiques sur le fonctionnement de la culture (modèle de culture), du cycle de l'eau (modèle hydrologique) ainsi que les relations entre les deux cycles (modèle agro-hydrologique) ;
- de diagnostiquer l'état des bassins versants ;
- de prédire les effets des conditions environnementales et des techniques de gestion sur le fonctionnement agro-hydrologique des bassins versants ;
- de définir les meilleures stratégies de gestion des bassins versants.

7.1. Modèles de culture

Un modèle de culture est un modèle de simulation numérique permettant la description et la prédiction (1) du fonctionnement du couvert végétal dans des conditions environnementales données et (2) des interactions entre les différentes composantes du continuum sol-plante-atmosphère (Castaneda-Vera et al., 2015). La majorité des modèles de culture opèrent à pas de temps journalier, avec une application locale à l'échelle de la parcelle. Ces modèles peuvent être mis en œuvre selon une approche multi-locale en considérant plusieurs parcelles indépendamment les unes des autres (e.g., sans prendre en compte les interactions entre les différentes parcelles, c'est-à-dire en ne prenant en compte que les flux verticaux et donc en négligeant les échanges latéraux).

Le développement des modèles de culture a connu plusieurs évolutions depuis le début du 20^{ème} siècle (Keating et Thorburn, 2018). Cela a commencé par une description quantitative des processus au niveau de la plante et du sol, grâce à la mise en place d'équations simples et d'indices (e.g., LAI) décrivant leurs fonctionnements. La deuxième génération des modèles est caractérisée par l'apparition des premiers modules simulant les processus des plantes (e.g., photosynthèse, dynamique de transpiration) et du sol (e.g., évaporation) séparément. Les années 70 et 80 marquent l'apparition de la troisième génération de modèles de culture, couplant pour la première fois les modules sol et plante, pour arriver enfin à la quatrième génération, à la fin des années 80, avec des modèles plus complets et plus complexes décrivant le développement et la production de la culture en relation avec les conditions environnementales (eau, nutriments, pratiques culturales, etc) (Keating et Thorburn, 2018). La Figure 1.10 représente les différentes étapes d'évolution de la modélisation des systèmes de culture.

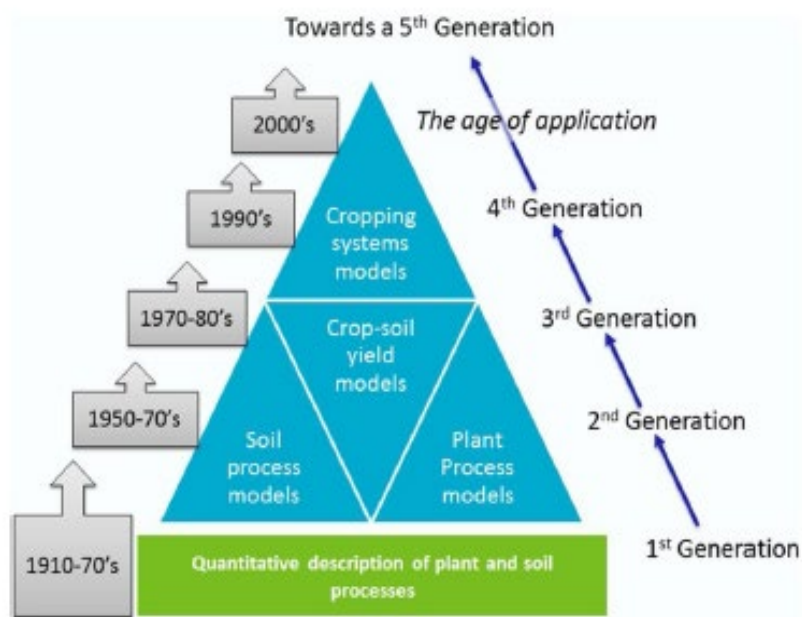


Figure 1.10 : Étapes d'évolution des modèles de culture (Keating et Thorburn, 2018)

Les 20 dernières années ont connu une intensification de l'utilisation des modèles de culture dans de nombreux domaines. Keating et Thorburn (2018) ont identifié 22 domaines d'utilisation, avec une dominance dans les domaines de l'agronomie et du changement climatique.

Les modèles de culture peuvent être classés selon la nature des équations utilisées ou bien selon le moteur principal décrivant le fonctionnement des cultures (Kanda et al., 2018).

Nature des équations utilisées : selon la nature des approches adoptées pour simuler les processus, les modèles de culture peuvent être classés en modèles mécanistes, empiriques ou semi-empiriques (Claverie et al., 2009 ; Kanda et al., 2018 ; Siad et al., 2019). Un modèle mécaniste est un modèle complexe, généralement utilisé dans la recherche. Il décrit de manière détaillée le fonctionnement du système étudié, en se basant sur une description biophysique des processus. Contrairement aux modèles mécanistes, les modèles empiriques sont des modèles relativement simples, généralement utilisés dans le domaine de l'ingénierie, et sont souvent basés sur des équations empiriques, issues de l'observation expérimentale. Les modèles semi-empiriques combinent à la fois des processus biophysiques et des paramètres empiriques. D'une manière générale, ces modèles contiennent un nombre limité de paramètres, ce qui facilite leur spatialisation (Claverie et al., 2009).

Moteur de simulation de la croissance végétale : Todorovic et al. (2009) proposent trois classes de modèles, distinguées selon les formalismes adoptés pour décrire la croissance et la production végétale.

- La première classe de modèles inclut les « *Carbon driven models* » comme WOFOST (Todorovic et al., 2009 ; de Wit et al., 2019), CROPGRO (Boote et al., 1998) et DSSAT (Jones et al., 2003). Dans ces modèles, le formalisme de calcul de la croissance de la plante est basé sur un terme d'assimilation du carbone atmosphérique au niveau des feuilles, par photosynthèse.
- La deuxième classe inclut les « *Solar-radiation driven models* » tels que CERES (Ritchie et al., 1998), EPIC (Williams et al., 1984), STICS (Brisson et al., 2003) et APSIM (Keating et al., 2003). Pour ces modèles, la biomasse est directement calculée à partir d'un terme d'interception du rayonnement solaire.
- La troisième et dernière classe de modèles inclut les « *Water driven models* » comme AquaCrop (Raes et al., 2009 ; Steduto et al., 2009) et CropSyst (Stöckle et al., 2003) dans lesquels la production de biomasse est proportionnelle à la quantité d'eau transpirée. Cependant, quand le déficit de pression de vapeur (VDP) est très faible, la relation transpiration - biomasse devient instable. Elle est donc remplacée, dans CropSyst, par une approche radiative dans laquelle la biomasse est déterminée en fonction du rayonnement photosynthétiquement actif intercepté (IPAR) (Stöckle et al., 2003 ; Kanda et al., 2018).

Les *carbon driven models* possèdent généralement une structure très complexe et demandent un nombre important de paramètres, ce qui rend leur utilisation très compliquée pour un public large, autre que les scientifiques (e.g., agriculteur, consultant) (Todorovic et al., 2009).

Contrairement aux *carbone driven models*, les *solar-radiation driven models* et les *water driven models* possèdent une structure moins complexe. L'avantage des *water driven models* est la possibilité de normaliser la productivité de l'eau (WP pour *water productivity*) pour les conditions climatiques en fonction de la demande évaporative et de la concentration du CO₂ atmosphérique, plutôt qu'en fonction de la VDP, comme c'est le cas avec les *solar-radiation driven models*, ce qui les rend plus adaptés à une application plus générique dans le temps et dans l'espace (Todorovic, 2009). En effet, la normalisation de la WP en fonction de la VDP est sujette à des incertitudes à cause de la sensibilité de la réponse stomatique à la VDP, qui varie selon les classes de plantes (C3 ou C4) et les espèces et (Steduto et Albrizio, 2005), ce qui rend les *solar-radiation driven models* moins génériques.

Il existe dans la littérature plusieurs études comparant les performances de différents modèles de culture. Palosuo et al. (2011) ont comparé huit modèles pour étudier leurs performances dans l'estimation du rendement du blé d'hiver sous différents climats en Europe, en utilisant un jeu minimal de données pour la calibration et la simulation. Ils ont conclu qu'aucun modèle n'est capable de bien estimer le rendement du blé pour tous les types d'environnement. Selon ces auteurs, l'obtention d'un minimum de précision et de robustesse nécessite un minimum de calibration. Une autre étude, menée par Soltani et Sinclair (2015), considère la robustesse et la transparence du modèle comme des éléments clés dans la comparaison des modèles. Cette étude avait comme but l'évaluation et la comparaison de la performance de quatre modèles de culture (deux modèles simples : CropSyst et SSM, et deux modèles plus complexes : APSIM et DSSAT), en se basant sur la robustesse et la transparence et en utilisant la même base de données d'entrée. Les auteurs ont conclu que les modèles les plus simples sont les plus robustes. Quant à la transparence, elle ne présente aucun effet sur la performance du modèle.

7.2. Modèles hydrologiques

Un modèle hydrologique stricto sensu est un modèle numérique permettant la modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant allant, selon le type de modèle, de la simple représentation de la relation pluie-débit à une représentation plus complète et plus complexe, prenant en compte les différentes composantes du cycle de l'eau et prenant en compte la variabilité spatiale des conditions environnementales (topographie, végétation, sol) (Ambroise, 1998 ; Chahinian, 2004 ; Siad et al., 2019).

La classification des modèles hydrologiques peut être basée sur plusieurs critères en relation avec (1) la nature des équations utilisées dans la simulation des différents processus, (2) la

nature des variables et des paramètres, (3) la discrétisation spatiale du bassin versant (Ambroise, 1998 ; Kanda et al., 2018 ; Siad et al., 2019) et (4) la discrétisation temporelle. Le Tableau 1.2 présente quelques exemples de modèles hydrologiques.

Tableau 1.2 : Quelques exemples de modèles hydrologiques ainsi que leur classification.

Modèle	Nature des équations utilisées			Discrétisation spatiale		Référence	
	Empirique	Mécanique	Conceptuel	Global	Semi-distribué		Distribué
MIKE SHE		X				X	(Refshaard et Storm, 1995)
GR4J			X	X			(Perrin et al., 2003)
HBV			X		X		(Bergström, 1995)
Unit hydrograph model	X					X	(Maidment et al., 1996)
Mhydass		X				X	(Moussa et al., 2002)

Nature des équations utilisées (Ambroise, 1998) : comme pour les modèles de culture, les modèles hydrologiques peuvent être soit mécaniques, basés sur une description physique des processus, soit empiriques, basés sur des équations empiriques issues de l'observation expérimentale. Toutefois, une troisième catégorie existe pour les modèles hydrologiques : les modèles conceptuels (Devia et al., 2015), basés sur des équations semi-empiriques dont les paramètres sont déterminés à partir de l'observation et du calage.

- **Modèles mécaniques** : ce sont des modèles qui décrivent le fonctionnement des bassins versants avec des équations physiques, en utilisant des paramètres mesurables, des variables d'état (e.g., ruissellement) reliées entre elles par des relations de conservation (conservation de masse et d'énergie) et des relations dynamiques (e.g., variation des flux en fonction du gradient ou de la résistance du milieu). Ces modèles permettent la simulation des différents processus du cycle de l'eau, tels que le ruissellement de surface à partir des équations de Saint-Venant et les écoulements en milieu saturé (écoulements de nappe) à partir des équations de diffusivité.

- **Modèles empiriques** : ce sont des modèles qui caractérisent d'une manière globale la relation pluie-débit, en utilisant par exemple des méthodes basées sur les fonctions de transferts (hydrogramme unitaire). Ces modèles font uniquement appel à des variables d'entrée et de sortie, sans prendre en compte la nature du bassin versant (topographie, type de sol, etc.). Les paramètres utilisés sont des paramètres globaux avec une signification purement mathématique, généralement non mesurable.
- **Modèles conceptuels** : ce sont des modèles qui représentent le bassin versant comme une succession de réservoirs connectés les uns aux autres. Avec ces modèles, le fonctionnement de chaque réservoir est décrit par une équation de bilan et une loi de vidange. Contrairement aux modèles empiriques, les modèles conceptuels sont capables de simuler les différents termes du cycle de l'eau (section 3.3.1), en s'appuyant sur des paramètres globaux (empiriques) non mesurables.

Natures des variables et des paramètres : les modèles peuvent aussi être classés selon le type de résultats fournis par la modélisation. Selon ce critère, nous distinguons des modèles déterministes, fournissant, pour chaque variable ciblée, une seule valeur simulée pour un ensemble unique de données d'entrée (Devia et al., 2015). Selon cette classification, le deuxième type de modèles correspond modèles stochastiques, fournissant une distribution de valeurs simulées, associée chacune à une probabilité d'occurrence, et ce pour un ensemble de données d'entrée (Nguyen, 2012) représentées par leur distribution statistique.

Discretisation spatiale : selon la discrétisation spatiale du bassin versant, les modèles hydrologiques peuvent être classés en trois catégories : 1) les modèles globaux dans lesquels le bassin versant est considéré comme une seule unité, et dont les variables et les paramètres d'entrée ne varient pas dans l'espace ; 2) les modèles distribués, dans lesquels tous les éléments du bassin versant sont pris en compte (Sitterson et al., 2018) et dont les variables et les paramètres d'entrée varient dans l'espace ; 3) et les modèles semi-distribués, se situant entre les deux catégories précédentes.

Pour les modèles distribués, nous distinguons (1) des modèles dits à mailles, dans lesquels l'espace est discrétisé en mailles régulières, et (2) des modèles à maillage irrégulier, dans lesquels le bassin versant est divisé en éléments homogènes en termes de caractéristiques (morphologiques, pentes, édaphiques et végétales) (Devia et al., 2015).

Discretisation temporelle : selon l'objectif de la modélisation, les modèles hydrologiques peuvent être événementiels, caractérisant le comportement du bassin versant uniquement lors

d'un événement de pluie, ou bien continu, permettant le suivi du fonctionnement du bassin versant d'une manière continue même en dehors des périodes pluvieuses (Gnouma, 2006).

7.3. Couplage modèles de culture – modèles hydrologique : modèles agro-hydrologiques

En raison de l'interdépendance entre le cycle de l'eau et le cycle des cultures, les modèles hydrologiques et les modèles de culture contiennent souvent des modules simulant le fonctionnement de la plante (pour les modèles hydrologiques) et la quantité d'eau dans la zone racinaire (pour les modèles de culture). Cependant, ces modules sont généralement frustrés, simulant la croissance végétale ou l'humidité du sol à partir de formalismes simples (Vereecken et al., 2016).

Pour simuler correctement le fonctionnement hydrologique et agronomique des bassins versants agricoles, ainsi que les relations entre le cycle de l'eau et le cycle de la culture, le couplage entre modèle hydrologique et modèle de culture semble être une voie prometteuse. De tel couplage doit permettre une simulation plus cohérente du fonctionnement agro-hydrologique des bassins versants agricoles, en simulant d'une manière plus fine les cycles de l'eau et des cultures, ainsi que les interactions entre ces deux cycles, tout en respectant la cohérence de leurs dynamiques temporelles. Le couplage permet aussi de spatialiser le fonctionnement de la végétation cultivée, en considérant les transferts d'eau latéraux au sein du bassin versant (Kanda et al., 2018). En effet, le grain spatial du modèle de culture, généralement celui de la parcelle, ne permet pas de considérer l'hétérogénéité du paysage en termes de sol, de végétation et de topographie. Il existe tout de même dans la littérature des tentatives de spatialisation des modèles de culture, en utilisant la télédétection (Duchemin et al., 2003 ; Han et al., 2019) ou bien en utilisant un système d'information géographique (SIG) (Lorite et al., 2013 ; Alaya et al., 2019). Cependant, ces approches de spatialisation demeurent à une échelle multi-locale, considérant les parcelles comme des entités indépendantes au sein du bassin versant, et ne prenant donc pas en compte l'influence des flux d'eau latéraux au sein du bassin versant.

Van Loo et Verstraeten (2021) ont essayé de spatialiser le modèle de culture AquaCrop pour étudier la productivité agricole historique dans un contexte de changement des conditions environnementales, mais sans aucun couplage avec un modèle hydrologique. Cette version modifiée d'AquaCrop prend en compte les transferts latéraux de surface entre les parcelles, en considérant que la quantité d'eau infiltrée, à un endroit donné, ne provient pas uniquement de la pluie mais aussi de l'eau ruisselée provenant de l'amont. Toutefois, cette spatialisation

d'AquaCrop ne résout pas le problème de la bonne simulation des processus hydrologiques (ruissellement, percolation, écoulements sub-surfaciques) ayant une dynamique temporelle plus fine que celle des processus agronomiques.

Le couplage entre modèle de culture et modèle hydrologique doit permettre de simuler, avec plus de cohérence, le fonctionnement agro-hydrologique des bassins versants. Grâce à l'utilisation d'un modèle hydrologique distribué, prenant en compte les transferts d'eau latéraux au sein du bassin versant, les variations spatio-temporelles de l'humidité du sol seront mieux simulées. Ceci doit permettre une meilleure simulation de la croissance et de la production végétale par le modèle de culture.

7.4. Méthodes de couplage et modèles agro-hydrologiques existants

Le couplage entre modèle de culture et modèle hydrologique repose sur la simulation fine de l'humidité du sol. Cette dernière représente donc la variable clé liant les deux types de modèles (Kanda et al., 2018). Plusieurs méthodes de couplage existent (Antle et al., 2001 ; Vereecken et al., 2016 ; Siad et al., 2019), allant de la plus simple à la plus complexe : couplage simple, couplage par l'intermédiaire d'une plateforme de modélisation et couplage complet. Avec le couplage simple (*light coupling* ou *loose coupling*), le modèle hydrologique et le modèle de culture sont exécutés d'une manière indépendante. La ou les variables de sortie d'un modèle servent de données d'entrée pour l'autre. L'avantage de cette méthode est que l'utilisateur n'a pas besoin de modifier les codes des modèles. Cependant, étant donné que les deux modèles fonctionnent d'une manière indépendante, les interactions entre les différents processus ne peuvent être prises en compte. La deuxième méthode de couplage consiste à utiliser une plateforme de modélisation, jouant le rôle d'intermédiaire entre les deux modèles. Cette méthode demande quelques adaptations des codes, assurant le bon fonctionnement des deux modèles. Ces adaptations consistent par exemple à des agrégations ou désagrégations de quelques variables, afin de respecter les pas de temps de chaque modèle (Vereecken et al., 2016 ; Lebon et al., 2022). La troisième méthode de couplage, dite couplage complet (ou *full coupling*), consiste à fusionner les codes des deux modèles et faire un nouveau modèle cohérent (Siad et al., 2019).

Le couplage des modèles hydrologiques et des modèles de culture est une approche relativement récente (Siad et al., 2019). Plusieurs études dans la littérature proposent des couplages entre différents modèles hydrologiques et modèles de culture, dans le but d'améliorer

l'estimation des flux d'eau et de nutriments, en interaction avec la végétation et les pratiques de gestion (Siad et al., 2019), à différentes échelles spatiales (de la parcelle aux grands bassins versants). Une revue bibliographique sur ce sujet est proposée par Kanda et al. (2018) et Siad et al. (2019). L'analyse des nouveaux modèles agro-hydrologiques proposés dans la littérature révèle l'existence de contraintes limitant leur utilisation. Ces contraintes peuvent être liées (1) à la complexité de l'un des modèles utilisés, due au nombre élevé de paramètres et de données d'entrée nécessaires ; (2) à la généralité du modèle qui peut être contrariée lorsque le couplage est fait pour répondre à une question spécifique, dans des conditions environnementales spécifiques et (3) aux difficultés liées à la discrétisation spatiale du bassin versant et à l'obtention de données et paramètres d'entrée spatialisés.

Lebon et al. (2022) proposent un modèle agro-hydrologique, MHYDAS-Small-Reservoirs, spatialement explicite, capable de considérer les différents éléments du bassin versant (parcelles, nappes phréatiques superficielles, retenues et réseau hydrographique). MHYDAS-Small-Reservoirs est un modèle agro-hydrologique conçu principalement pour étudier l'impact des retenues sur les débits des rivières. Le modèle de culture utilisé dans ce couplage est un modèle très simple, ne permettant de calculer que le rendement final en fonction du rendement potentiel⁶ et du stress hydrique (Constantin et al., 2015) (voir détails dans la section 2.2 du chapitre 2). La croissance de la partie aérienne de la plante est exprimée par le coefficient cultural (Kc) (Constantin et al., 2015). MHYDAS-Small-Reservoirs est donc un modèle agro-hydrologique distribué, prenant en compte les transferts d'eau latéraux au sein des bassins versants. Cependant, en raison de la simplicité du modèle de culture utilisé, MHYDAS-Small-Reservoirs n'est pas capable de décrire de manière détaillée le fonctionnement de la végétation, ainsi que l'effet du cycle de l'eau sur les processus agronomiques, dans un contexte d'agriculture pluviale méditerranéenne.

Un autre modèle agro-hydrologique, largement utilisé dans la littérature, est le modèle SWAT. SWAT est un modèle mécaniste, semi-distribué, qui a pour objectif l'évaluation de l'impact de la gestion des terres et de l'agriculture sur les ressources en eau, les sédiments et les flux chimiques au sein des bassins versants et des rivières (Arnold et al., 1998 ; Golden et al., 2014). À la base, SWAT est un modèle hydrologique capable de simuler les processus hydrologiques tels que le ruissellement de surface, ainsi que les processus agronomiques tels que la production

⁶Le rendement potentiel correspond à la potentialité de production souhaitée par l'agriculteur sur une parcelle, qui intègre donc des éléments économiques et des contraintes techniques que se fixe l'agriculteur (Mathieu and Lozet, 2011).

végétale, grâce à l'inclusion d'une version simplifiée du modèle de culture EPIC (Williams et al., 1984 ; Francesconi et al., 2016). Malgré de nombreuses utilisations de SWAT, dans une large gamme de conditions environnementales, sa mise en œuvre est contrariée par sa complexité (Van Gaelen et al., 2017) et par le mode de discrétisation spatiale du bassin versant, qu'il considère. En effet, dans SWAT, la taille de l'unité hydrologique est comprise entre 50 ha et 500 ha (Tuppad et al., 2011). Avec ce grain spatial, SWAT ne peut pas être utilisé dans de petits bassins versants où la taille des parcelles ne dépasse pas un hectare.

Van Gaelen et al. (2017) proposent un modèle agro-hydrologique semi-distribué, basé sur le couplage entre le modèle AquaCrop et un modèle hydrologique conceptuel (AquaCrop-Hydro), dans le but de simuler la production agricole à l'échelle de la parcelle, le bilan hydrique du sol à l'échelle de la parcelle et du bassin versant, ainsi que le débit de la rivière à l'exutoire du bassin versant. Pour chaque unité spatiale (e.g., parcelle), AquaCrop simule la production végétale et l'humidité du sol. La moyenne pondérée des humidités du sol, calculée au niveau de chaque unité spatiale, sert de donnée d'entrée au modèle hydrologique pour calculer le débit d'eau à l'exutoire.

Dans les modèles agro-hydrologiques semi-distribués, comme SWAT et AquaCrop-Hydro, les interactions entre cycle de l'eau et cycle de la végétation, par les transferts des eaux de ruissellement via la connectivité hydrologique, sont négligées. Hors, en milieux semi-aride et aride, l'eau amont ruisselée peut se ré-infiltrer en aval au niveau des zones non saturées (Van Loo et Verstraeten, 2021). Cette ré-infiltration des eaux du ruissellement peut constituer une source d'eau supplémentaire pour les plantes. Narain et al. (1998) ont montré que l'utilisation de l'eau par les plantes, ainsi que l'efficacité de l'eau, sont étroitement liées à la quantité d'eau ruisselée. Dans la modélisation du comportement agro-hydrologique des bassins versants, la connectivité hydrologique, et donc les échanges d'eau inter-parcellaires, ne sont pris en compte que par les modèles hydrologiques distribués. Toutefois, d'un point de vue agronomique, l'étude de l'influence de la connectivité hydrologique sur la production végétale liée à la ré-infiltration des eaux de ruissellement sur les sols non saturés situés en aval n'a pas été abordée dans la littérature, à notre connaissance.

À retenir

- Différentes méthodes de couplage de modèles, existent avec des degrés de complexité différents.
- La littérature propose quelques modèles agro-hydrologiques qui diffèrent entre eux par la complexité de l'un des modèles utilisés ou par la discrétisation spatiale du bassin versant.
- L'interaction entre le cycle de l'eau et le cycle de la végétation, via les transferts d'eau latéraux entre les parcelles, peut être prise en compte avec des modèles agro-hydrologiques distribués.
- L'effet des transferts d'eau latéraux sur la production agricole, via la connectivité inter-parcellaire, n'a pas été évalué.

8. Objectifs et questions scientifiques

Compte tenu des défis actuels auxquels la région méditerranéenne fait face, la satisfaction des besoins alimentaires des populations passe, entre autres, par une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes agricoles. Cela permettra notamment aux différents acteurs, à différentes échelles spatiales, d'envisager les meilleures solutions pour assurer la sécurité alimentaire des populations et préserver les ressources naturelles. La modélisation numérique du fonctionnement agro-hydrologique des bassins versants, via des modèles agro-hydrologiques distribués, semble être une solution prometteuse pour y parvenir. Ces modèles permettent de simuler d'une manière fine le cycle agronomique et le cycle hydrologique, en considérant toutes les relations existant entre ces deux cycles. La relation entre les deux cycles, au sein du bassin versant, passe notamment par les transferts d'eau latéraux, via la connectivité hydrologique entre les parcelles (connectivité inter-parcellaire) et par la ré-infiltration des eaux de ruissellement venant de l'amont, au niveau des parcelles aval du bassin versant, constituant ainsi de l'eau supplémentaire pour la culture. Toutefois, l'importance de ces échanges d'eau entre les différentes parcelles sur le fonctionnement agronomique des cultures demeure peu étudiée.

L'objectif de cette thèse est donc d'approfondir les connaissances scientifiques sur le rôle de la connectivité inter-parcellaire dans le fonctionnement des cultures, en lien avec la dynamique de l'eau dans le sol. De cet objectif général émergent deux principales questions scientifiques.

La première question consiste à choisir un modèle de culture adéquat pour étudier la connectivité inter-parcellaire et évaluer, dans un premier temps, ses capacités à simuler un panel de processus agro-hydrologiques (croissance et production végétale, ruissellement...), en relief collinaire méditerranéen, et ce pour une diversité de sols et de végétations représentatives des paysages agricoles méditerranéens.

La deuxième question consiste à hiérarchiser les facteurs de premier ordre qui influencent le fonctionnement de la végétation cultivée, dont la connectivité hydrologique, et d'identifier d'éventuelles situations typiques pour lesquelles l'effet de la connectivité est significatif.

Suite à cet état de l'art, nous établissons une liste de modèles de culture existant dans la littérature, afin de choisir le modèle plus adapté aux agrosystèmes méditerranéens pluviaux en conditions de relief collinaire qui constituent notre objet d'étude. La deuxième étape est d'évaluer les capacités de ce modèle à simuler un ensemble de processus agro-hydrologiques pour notre objet d'étude, incluant une diversité de combinaisons de sol et de cultures représentatives de l'agriculture méditerranéenne. Le modèle ainsi éprouvé est ensuite utilisé pour étudier l'impact des connectivités inter-parcellaires sur le fonctionnement des cultures via la mise en œuvre d'une expérience numérique conduite dans un contexte de climat actuel. Nous terminons ce travail de thèse par une conclusion générale, dans laquelle nous discutons (1) des principaux résultats obtenus, (2) des éventuelles faiblesses en rapport avec notre approche méthodologique et (3) et des différentes perspectives qui en émergent.

Chapitre 2 : Stratégie méthodologique

Nous consacrons ce deuxième chapitre à la stratégie méthodologique de la thèse, constituée de quatre grandes parties. Nous présentons dans la première partie la stratégie utilisée pour quantifier l'impact de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures. Nous détaillons dans la deuxième partie les différents critères et étapes qui ont conduit au choix du modèle de culture, en relation avec les questions de recherches abordées et l'objet de l'étude (les agrosystèmes pluviaux méditerranéens en conditions de relief collinaire). La troisième partie est consacrée à la présentation des caractéristiques générales du modèle de culture choisi. Nous réservons la dernière partie à (1) la discussion des critères de choix d'un site d'étude représentatif des agrosystèmes pluviaux méditerranéens, (2) la présentation du site d'étude choisi et (3) la présentation de la base de données disponible, permettant de répondre à nos différentes questions de recherche.

1. Quantification de l'impact de la connectivité hydrologique sur le fonctionnement des cultures

Pour répondre à l'objectif de la thèse, nous avons décidé d'avoir recours à la modélisation numérique. Cette approche offre la possibilité de réaliser des expérimentations numériques sur de grandes étendues spatiales et temporelles, dans différentes conditions environnementales (par exemple en climat actuel et futur), tout en considérant l'effet de plusieurs facteurs d'influence, de manière individuelle et combinée. Toutefois, il est important de garder à l'esprit les limites de la modélisation, principalement liées à des représentations simplifiées de la réalité, à des incertitudes induites par les hypothèses sous-jacentes, et à des incertitudes sur la quantification des paramètres et variables (Palosuo et al., 2011 ; Castaneda-Vera et al., 2015 ; Soltani et Sinclair, 2015).

Comme conclu dans le chapitre 1, le couplage entre un modèle de culture et un modèle hydrologique distribué permet de mieux simuler les variations spatiales de l'humidité du sol et donc la croissance et la production agricole. Cette meilleure simulation de la variation spatiale de l'humidité du sol passe, entre autres, par la prise en compte des transferts d'eau latéraux (ruissellement de surface) via la connectivité hydrologique. En effet, au cours de son acheminement vers l'exutoire, le ruissellement venant de l'amont peut se ré-infiltrer, constituant ainsi une source d'eau supplémentaire pour les cultures situées en aval. Si l'effet de la connectivité hydrologique sur les processus hydrologiques a été largement étudié, son impact sur le fonctionnement agronomique des cultures a été très peu abordé dans la littérature.

Pour évaluer l'effet de la connectivité hydrologique entre les parcelles (connectivité inter-parcellaire) sur le fonctionnement des cultures, nous avons décidé de conduire une expérimentation numérique simple, en utilisant un modèle de culture, et en travaillant uniquement sur deux parcelles connectées. En effet, conduire une expérimentation numérique à l'échelle du bassin versant pour comprendre le rôle de la connectivité inter-parcellaire peut rendre l'analyse des résultats compliquée, compte tenu de l'hétérogénéité des conditions environnementales à cette échelle. De plus, la compréhension préalable du rôle de la connectivité inter-parcellaire conditionnera le couplage des modèles, qui peut être, selon la méthode du couplage choisie, plus ou moins difficile à implémenter. Autrement dit, si l'étude de la connectivité inter-parcellaire montre que cette dernière n'a pas d'effet significatif sur le fonctionnement des cultures, nous pourrions décider de procéder à un couplage simple (*loose coupling*, voir chapitre 1 section 7.4), sans prise en compte des transferts d'eau latéraux.

Pour réaliser cette expérimentation numérique, nous avons besoin (1) de choisir un modèle de culture pertinent, capable de simuler à la fois la croissance et le développement de la culture, et le bilan hydrique du sol avec ses différentes composantes, et (2) de s'assurer de ses capacités à simuler le fonctionnement agronomique des cultures en contexte d'agriculture pluviale méditerranéenne, en relief collinaire. L'évaluation des capacités du modèle de culture, ainsi que la réalisation de l'expérimentation numérique, nécessitent de choisir un site d'étude représentatif des agrosystèmes pluviaux méditerranéens collinaires et disposant d'une base de données riche.

Pour résumer, la vérification de l'hypothèse quant à l'importance de la connectivité inter-parcellaire dans le fonctionnement des cultures se déroule comme suit :

- étape 1 : choisir un modèle de culture simple, adapté aux objectifs de la présente étude ;
- étape 2 : choisir un site d'étude représentatif du système agricole pluvial méditerranéen ;
- étape 3 : évaluer les capacités du modèle choisi à simuler le fonctionnement des agrosystèmes pluviaux méditerranéens en relief collinaire ;
- étape 4 : réaliser l'expérimentation numérique pour vérifier l'hypothèse de travail.

Nous évaluons l'impact de la connectivité inter-parcellaire en analysant des indicateurs de fonctionnement hydrologique (coefficient de ruissellement et coefficient de percolation), des variables de production agricole (biomasse aérienne sèche et rendement) et des indicateurs de fonctionnement agronomique (efficacité agronomique de l'eau : WUE). Cette dernière est considérée comme une variable intégratrice des interactions entre eau disponible et production végétale, comme discuté dans le chapitre précédent.

La Figure 2.1 synthétise la démarche générale de la thèse. Dans cette partie, nous détaillons le choix du modèle de culture (étape 1) et le choix du site d'étude (étape 2). L'évaluation du modèle de culture choisi (étape 3) ainsi que l'expérimentation numérique (étapes 4' et 4'') seront détaillées dans les chapitres 3 et 4, respectivement.

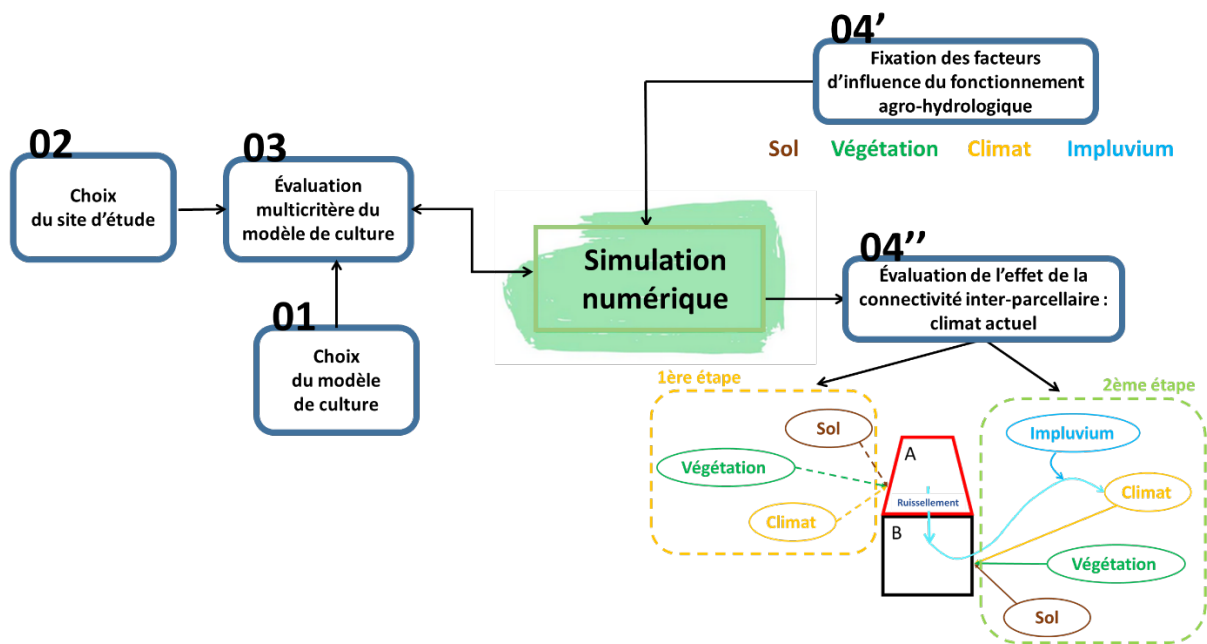


Figure 2.1 : Graphique de synthèse de la démarche générale de la thèse.

2. Choix du modèle de culture

Le choix du modèle de culture est fait en suivant trois étapes :

- étape 1 : détermination des critères de choix ;
- étape 2 : sélection de quelques modèles de la littérature ;
- étape 3 : comparaison des modèles en se référant aux critères fixés.

2.1. Critères de choix

Tous les modèles de culture ont été développés, testés et validés pour simuler un ensemble de processus agro-hydrologiques sous des conditions environnementales particulières, selon des variables de forçage données, et avec un nombre donné de paramètres. Pour atteindre leurs objectifs, ils utilisent chacun des approches et des concepts différents. Ces différences ne se manifestent pas uniquement sur le plan scientifique (approches, paramètres et variables utilisés) mais aussi sur le plan technique (langage et codage). Le langage informatique et le codage diffèrent d'un modèle à un autre. Ces différences scientifiques et techniques conditionnent, d'une manière ou d'une autre, le choix du modèle. Pour faciliter ce choix, il est important de mettre en place une liste de critères qui assurent la pertinence du modèle sélectionné.

Pour rappel, l'objectif principal de ce travail de thèse est d'approfondir la connaissance scientifique quant au rôle de la connectivité inter-parcellaire dans le fonctionnement agronomique des cultures pluviales méditerranéennes, en relief collinaire, dans un contexte de climat actuel. De ce fait, le modèle de culture choisi, doit répondre aux trois critères suivants :

- Être compatible avec les objectifs de la présente recherche :
 - le modèle doit simuler les variables nécessaires au calcul des indicateurs agronomiques (indice foliaire, taux de couverture végétale, biomasse, rendement) et hydrologiques (infiltration, percolation, ruissellement, évaporation du sol, transpiration végétale) ;
 - le modèle doit prendre en compte les variables de forçage climatique (concentration atmosphérique en CO₂, température, précipitations, évapotranspiration de référence) pour étudier les conditions climatiques actuelles et futures ;
 - le modèle doit tenir compte des stress hydrique et thermique. L'eau est le facteur clé dans cette étude, étant donné qu'elle représente le facteur limitant de la productivité de l'agriculture pluviale en milieux aride et semi-aride. La prise en compte du stress thermique est aussi importante dans le cas d'épisodes de chaleur extrême, notamment pour le climat futur ;
 - le modèle choisi doit simuler le fonctionnement des cultures représentatives de l'agriculture pluviale méditerranéenne.
- Compromis entre robustesse et complexité : le modèle choisi doit simuler d'une manière acceptable la dynamique temporelle de la croissance de la culture ainsi que son rendement final (Soltani et Sinclair, 2012), indépendamment des conditions environnementales (Coucheney et al., 2015), tout en ayant un nombre réduit de paramètres d'entrée afin de faciliter sa spatialisation.
- Caractéristiques techniques : le code du modèle choisi doit être en libre accès (*open source*) et doit avoir un langage et une structure (codée en modules) qui facilitent son couplage avec d'autres modèles, ou son intégration à des plateformes de spatialisation.

2.2. Sélection et présentations des modèles de culture

La deuxième étape, après la fixation des critères de choix, consiste à sélectionner quelques modèles de culture de la littérature. De ce fait, nous avons sélectionné dix modèles, à savoir : APSIM (Keating et al., 2003), AquaCrop (Raes et al., 2009 ; Steduto et al., 2009), AqYield (Constantin et al., 2015 ; Tribouillois et al., 2018), CropSyst (Stöckle et al., 2003), Daisy

(Abrahamsen et Hansen, 2000 ; Hansen et al., 2012), DSSAT(Jones et al., 2003), EPIC (Williams et al., 1984), SAFYE (Duchemin et al., 2005 ; Silvestro et al., 2017), STICS (Brisson et al., 2003) et WOFOST (Todorovic et al., 2009 ; de Wit et al., 2019).

D'une manière générale, ces modèles diffèrent les uns des autres par (1) le formalisme adopté pour décrire la croissance et la production végétale (*water driven models*, *solar-radiation driven models* et *carbon driven models*) ; (2) leur complexité, définie par le nombre de paramètres et de données d'entrée (plus le nombre de paramètre est important, plus le modèle est complexe) (Soltani et Sinclair, 2015) ; (3) la nature des équations utilisées pour décrire les processus biophysiques (modèles mécanistes ou modèles empiriques) ; et (4) les cultures simulées : cultures annuelles, cultures pluriannuelles, céréalières, légumineuses, fourrages, etc.

Tous les modèles sélectionnés sont des modèles unidimensionnels, opérant à un pas de temps journalier et à une échelle locale, généralement celle de la parcelle. De manière générale, tous ces modèles sont capables de simuler les principales variables liées au bilan hydrique du sol (ruissellement, percolation, évapotranspiration) et à la croissance et à la production végétale (indice foliaire, biomasse aérienne sèche et rendement. Il existe toutefois quelques exceptions comme par exemple AqYield qui ne simule pas la biomasse aérienne sèche ou bien SAFYE qui simule uniquement les flux d'eau verticaux et néglige le ruissellement. Pour décrire le fonctionnement des cultures, tous les modèles ont besoin de :

- données climatiques, avec au minimum des données de pluie, de température de l'air, de rayonnement et d' ET_0 . Mais selon la complexité du modèle et les processus simulés, des modèles comme EPIC, requièrent aussi des données sur la direction et la vitesse du vent ;
- données de sol, avec au minimum des données sur la texture, la profondeur du sol, et les propriétés hydrodynamiques du sol ;
- données de pratiques agricoles : date de semis, labour, fertilisation ; des modèles comme Daisy et EPIC, capables de simuler la dynamique des pesticides demandent également des données supplémentaires concernant, par exemple, la quantité de pesticides appliquée ou bien la composition du pesticide en question etc ;
- données de culture : stades phénologiques, coefficient de stress, etc. Le nombre et la nature des paramètres demandés diffèrent selon la complexité et le type du modèle, les paramètres des modèles mécanistes étant généralement mesurables, contrairement à ceux des modèles empiriques.

Pour avoir une idée générale sur l'objectif du développement du modèle, sa nature et les principaux processus et variables simulées, une brève description des différents modèles est donnée ci-dessous. Ceci nous guidera ensuite dans notre choix.

APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) : APSIM est un *solar-radiation driven model* (Todorovic et al., 2009 ; Bassu et al., 2014), complexe (nombre important de paramètres d'entrée) (Soltani et Sinclair, 2015), principalement conçu pour simuler la production végétale en lien avec le climat et les pratiques agricoles, pour une éventuelle évaluation du coût économique et environnemental de ces pratiques (Keating et al., 2003).

AquaCrop : développé par la FAO, AquaCrop est un *water driven model*, simple (Kanda et al., 2018), dont le principal objectif est de simuler la production végétale dans des conditions de stress hydrique. Principalement conçu pour simuler le fonctionnement des cultures annuelles (e.g., céréales, tomate, coton), le modèle a été utilisé pour des études économiques (Cusicanqui et al., 2013), de changement climatique (Rashid et al., 2019 ; Muluneh, 2020) et de gestion des pratiques agricoles (date de semis, calendrier d'irrigation, etc) (Araya et al., 2010; El Mokh et al., 2017) dans le but d'améliorer la production végétale et l'efficacité de l'eau.

AqYield : développé dans le contexte du sud-ouest français, AqYield est un *water driven model*, simple, dont le but est de simuler la production végétale pour évaluer les systèmes de cultures alternatifs, la gestion de l'irrigation et d'être utilisé dans la recherche participative (Constantin et al., 2015). Grâce à son intégration dans une plateforme de simulation, AqYield a été utilisé pour simuler les interactions entre les systèmes de cultures irriguées et l'hydrologie (Constantin et al., 2015 ; Lebon et al., 2022). La croissance végétale est simulée uniquement par le coefficient cultural (Kc) et la profondeur racinaire. Le rendement est calculé directement à la récolte (sans calcul de la biomasse) en fonction du rendement potentiel local et d'un indice de satisfaction hydrique (Constantin et al., 2020).

CropSyst : comme AquaCrop et AqYield, CropSyst est un *water driven model*, relativement complexe, capable de simuler le fonctionnement de la culture pour analyser l'impact des conditions environnementales et de la rotation culturale sur la productivité végétale.

Daisy : Daisy est un *carbon driven model* (Hansen et al., 2012), complexe, principalement conçu pour simuler le bilan hydrique et azoté du sol, le lessivage de l'azote et la qualité des sols (quantité de carbone) dans les terres cultivées (Abrahamsen et Hansen, 2000), pour une utilisation dans la recherche et comme outil d'aide à la décision dans la gestion des pratiques agricoles.

DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) : DSSAT est un *carbon driven model*, complexe (Corbeels et al., 2016), principalement développé pour répondre au besoin d'avoir un modèle intégrant les connaissances sur le fonctionnement de la culture, du climat et du sol, pour mieux comprendre le fonctionnement de la culture dans son milieu dans n'importe quelles conditions environnementales, et de fournir un outil d'aide à la gestion des systèmes agricoles (Jones et al., 2003). Le modèle a été largement utilisé dans la littérature, principalement dans le domaine de la gestion des pratiques agricoles (fertilisation, irrigation) et du changement climatique.

EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) : EPIC est un *solar-radiation driven model*, complexe, développé principalement pour étudier l'effet de l'érosion du sol sur la production végétale et déterminer des stratégies optimales de gestion des systèmes de culture (Williams et al., 1984).

SAFYE (Simple Algorithm For Yield and Evapotranspiration) : comme pour APSIM et EPIC, SAFYE est un *solar-driven model*, simple. Il s'agit d'une version modifiée du modèle SAFY, dans laquelle un module de bilan hydrique a été ajouté. Le modèle SAFY a été développé afin d'avoir un modèle de culture capable de simuler le fonctionnement de la culture, en région semi-aride, avec un nombre limité de paramètres d'entrée, afin de faciliter sa spatialisation par télédétection (Duchemin et al., 2005).

STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) : STIC est un *solar driven model*, complexe, principalement conçu pour avoir un modèle de culture (1) générique et adapté à une large gamme de cultures (Brisson et al., 2003), (2) modulable, offrant la possibilité de rajouter des nouveaux modules (e.g., volatilisation de l'ammoniac) et (3) capable de fournir des conseils auprès des agriculteurs concernant les pratiques agricoles.

WOFOST (World FOod STudies) : WOFOST est un *carbon driven model*, développé principalement pour étudier la production agricole des cultures annuelles dans des conditions climatiques et hydrologiques tropicales (de Wit et al., 2019). WOFOST est un modèle mécaniste, décrivant le fonctionnement de la culture selon des équations à base physique, et ses performances ont également été prouvées en climat Européen (Todorovic et al., 2009 ; de Wit et al., 2019).

Le Tableau 2.1 ci-après présente les principales caractéristiques des modèles de culture sélectionnés

Tableau 2.1 : Caractéristiques générales des modèles de cultures sélectionnés.

Modèles de culture ¹	AP	AC	AY	CS	Da	DS	EP	SA	ST	WO
Moteur de simulation ²	SRD	WD	WD	WD	CD	CD	SRD	SRD	SRD	CD
Approche utilisée ³	M	M	E	M	M	M	M	SM	M	M
Complexité ⁴	C	RS	S	RS	C	C	C	S	C	C
Cultures considérées ⁵	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	Cr	CA	CA
Stress simulés ⁶	Pr F	Pr					Pr F		CP	
Type de stress hydrique ⁷	H T A	H T A	H	H T N	H N A	H N A	H N A At	H T	H T N	H N A
Processus simulés ⁸	S	S	S	S	E	E	E S	S	S	S
Mouvement de l'eau dans le sol ⁹	CPV BH BA BP MO pH E TS	CPV BH	CPV BH	CPV BH BA BS PDR	CPV BH BA BT BC	CPV BH BA BC	CPV BH E BT BA BP CE FN	CPV BH	CPV BH, BA	CPV BH
Phénologie ¹⁰	C T Lj	C T	C T	C T Lj	R T	C T Lj	C T Lj	C T	C T Lj At	C T Lj
Variables agronomiques simulées ¹¹	LAI PR AGB Yld	CC PR AGB Yld	Kc PR Yld	LAI PR DR AGB Yld	LAI AGB Yld	LAI PR DR AGB Yld	LAI PR AGB Yld	LAI AGB Yld	LAI PR DR AGB Yld QG	LAI PR AGB Yld
Variables hydrologiques simulées ¹²	Tr Es R ESS	Tr Es R DP RC	R DP Tr Es	Tr Es R In	Tr Es R In RC AFN DP	Tr Es R DP USF	Tr Es R Q DP USF SF FN	Tr Es DP	Tr Es R RC DP	Tr Es R DP
Types d'érosion du sol ¹³	EH	–	–	EH	–	–	EH EE	–	–	–
ET ₀ ¹⁴	PT	PM	–	PM PT	PM	PM	PM	PM	PT	P

¹Modèles de culture : AP = APSIM ; AC = AquaCrop ; AY = AqYield ; CS = CropSyst ; Da = Daisy ; DS = DSSAT ; EP = EPIC ; SA = SAFYE ; ST = STICS ; WO = WOFOST

²Moteur de simulation : SRD = solar-radiation driven model ; WD = water driven model ; CD = carbon driven model

³Approche utilisée : M = mécaniste ; E = empirique ; SE : semi-empirique

⁴Complexité : C = complexe ; RS = relativement simple ; S = simple

⁵Cultures considérées : CA = culture annuelle ; F = fourrage ; Pr = parcours ; Cr = céréales ; F = forêts ; P = Cultures pluriannuelles

⁶Stress simulés : H = stress hydrique ; N = stress azoté ; A = anoxie ; At = autres types de stress

⁷Type de stress hydrique : S = seuil critique d'humidité du sol ; E = rapport entre évapotranspiration réelle et évapotranspiration maximale (ETa/ETM)

⁸Processus simulés : CPV = Croissance et production végétale ; BH = bilan hydrique du sol ; E = érosion du sol ; BT = bilan thermique (flux de chaleur dans le sol) ; BA = bilan azoté ; BC = bilan carbone du sol ; BP = bilan de phosphore ; CE = coût économique des pratiques agricoles et de l'érosion du sol ; BS = bilan salin ; TS = transfert des solutés ; PDR = production et décomposition des résidus ; BP = bilan des pesticides

⁹Mouvement de l'eau dans le sol : C = approche réservoir ; R = approche basée sur l'équation de Richards

¹⁰Phénologie : phénologie des cultures en fonction de : T = température ; Lj = longueur du jour (photopériode) ; At = Autres : stress hydriques/nutriments considérés

¹¹Variables agronomiques simulées : LAI = indice foliaire ; PR = profondeur racinaire ; DR = densité racinaire ; AGB = biomasse aérienne sèche ; Yld = rendement ; QG = qualité des graines à la récolte

¹²Variables hydrologiques simulées : Tr = Transpiration ; Es = évaporation du sol ; R = ruissellement ; Q = débit ; DP = percolation ; RC = remontée capillaire ; In = Interception ; AFN = Accumulation et fonte des neiges ; UFN = unsaturated flows ; SF = Saturated flow ; FN = fonte des neiges

¹³Types d'érosion du sol : EH = érosion hydrique ; EE = érosion éolienne

¹⁴ET₀ : PM = Penman-Montheith ; PT = Priestley-Taylor ; P = Penman

2.3. Comparaison des modèles

Ici nous comparons les modèles de culture entre eux dans le but de choisir un. Chaque critère de comparaison, correspondant respectivement aux quatre sous-sections suivantes, a permis d'éliminer progressivement les modèles de culture non appropriés pour atteindre l'objectif fixé.

2.3.1. Variables à simuler par le modèle

Le choix du modèle de culture a commencé par l'établissement d'une liste de variables que le modèle doit être capable de simuler, pour 1) la validation des capacités du modèle choisi, à partir de mesures usuelles, à simuler la dynamique temporelle de la croissance végétale et la production finale des cultures, en condition d'agriculture pluviale méditerranéennes, en relief collinaire et 2) le calcul des indicateurs agronomiques en lien avec l'efficacité agronomique de l'eau, et des variables hydrologiques en lien avec le bilan hydrique du sol. Pour décrire le fonctionnement agronomique des cultures, nous souhaitons décrire la croissance végétale au cours du cycle cultural par l'intermédiaire de l'indice foliaire (LAI) ou du taux de couverture végétale (CC), ainsi que la production végétale par la simulation de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld). Les variables LAI et CC nous permettront principalement la validation du modèle choisi, tandis que les variables AGB et Yld nous permettront, à la fois, la validation du modèle et le calcul des indicateurs agronomiques tels que l'efficacité agronomique de l'eau. Pour décrire le fonctionnement hydrologique de la parcelle et/ou du bassin versant, il est important de simuler les différentes variables du bilan hydrique du sol, à savoir : l'infiltration (Infl), le ruissellement (R), la percolation (DP pour *deep percolation*), la

transpiration (Tr), l'évaporation du sol (Es) et l'humidité du sol (SWC pour *soil water content*). Le Tableau 2.2 résume ces variables et liste celles simulées par chaque modèle.

Dans ce tableau, nous remarquons qu'AquaCrop est le seul modèle qui utilise CC au lieu du LAI pour simuler le développement du couvert végétal. En cas d'absence de mesure de CC, la littérature propose une relation permettant le calcul de CC en fonction du LAI. Ce point n'est donc pas bloquant.

Tableau 2.2 : Variables simulées par les modèles envisagés. Les variables agronomiques sont l'indice foliaire (LAI), le taux de couverture végétale (CC), la biomasse (AGB) et le rendement (Yld). Les variables hydrologiques sont la transpiration (Tr), l'évaporation du sol (Es), l'infiltration (Infl), le ruissellement (R), la percolation (DP). SWC représente l'humidité du sol.

Modèles	Variables à simuler par les modèles										
	LAI	CC	Tr	Es	AGB	Yld	Infl	R	DP	SWC	Exclu
APSIM	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
AquaCrop		×	×	×	×	×	×	×	×	×	
AqYield			×	×		×	×	×	×	×	×
CropSyst	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
Daisy	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
DSSAT	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
EPIC	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
SAFYE	×		×	×	×	×	×		×	×	×
STICS	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
WOFOST	×		×	×	×	×	×	×	×	×	

Le Tableau 2.2 montre aussi qu'AqYield est le seul modèle qui ne simule ni la croissance végétale, exprimée par le LAI ou le CC, ni la biomasse. Comme discuté dans la section 2.2, AqYield est un modèle très simple, calculant un rendement final à la récolte en fonction du rendement potentiel de la région. De ce fait, il est difficile de vérifier les performances de ce modèle à simuler la dynamique temporelle de la croissance de la culture, et de calculer l'efficacité agronomique de l'eau à partir d'AGB. Ce tableau montre aussi que le modèle SAFYE ne simule pas le ruissellement. En effet, étant donné que ce modèle a été développé pour une application en région semi-aride, ses développeurs ont supposé que le ruissellement peut être considéré comme négligeable dans ces régions, et le bilan hydrique du sol est calculé uniquement en fonction des flux d'eau verticaux (Es, Tr, DP) (Duchemin et al., 2005). De ce fait, sans un préalable couplage avec un modèle hydrologique simulant le ruissellement, il n'est

pas possible d'utiliser SAFYE dans notre étude. Pour conclure, cette étape nous a permis d'exclure les deux modèles AqYield et SAFYE.

2.3.2. Forçage climatiques et types de stress

Le deuxième critère pour le choix du modèle consiste à analyser les variables de forçage climatique ainsi que les différents types de stress considérés par ces modèles (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Variables de forçage climatiques et types de stress considérés. P, Tmp et ET0 désignent la pluie, la température de l'air et l'évapotranspiration de référence, respectivement. H désigne le stress hydrique et T désigne le stress thermique.

Modèles	Variables de forçage climatiques considérées				Stress considérés		Exclu
	P	Ta	ET ₀	[CO ₂] atmosphérique	H	T	
APSIM	×	×	×	×	×	×	
AquaCrop	×	×	×	×	×	×	
CropSyst	×	×	×	×	×	×	
Daisy	×	×	×	×	×		×
DSSAT	×	×	×	×	×		×
EPIC	×	×	×	×	×	×	
STICS	×	×	×	×	×	×	
WOFOST	×	×	×		×		×

Variables du forçage climatiques : pour une application en condition de climat futur, outre la température, la pluie et l'évapotranspiration, il est important que le modèle prenne en compte la concentration en CO₂ atmosphérique pour son influence sur le rendement des plantes et l'efficacité agronomique de l'eau. L'analyse du Tableau 2.3 montre que, parmi les huit modèles retenus à l'étape précédente, WOFOST ne prend pas en compte l'effet de la concentration en CO₂ atmosphérique sur la croissance des cultures.

Types de stress : étant donné que dans les régions semi-arides l'eau est le principal facteur limitant la production agricole, et au vu de l'importance de la température dans le cycle cultural de la plante, nous nous intéressons dans cette étude au stress hydrique au premier ordre et au stress thermique au deuxième ordre. Les stress azoté et phosphoré sont négligés car l'azote et le phosphore ne sont pas les facteurs limitant d'ordre un dans le contexte de l'agriculture pluviale méditerranéenne et nous considérons aussi qu'ils peuvent être apportés en quantité suffisante par l'agriculteur. D'après le Tableau 2.3, les trois modèles Daisy, DSSAT et

WOFOST ne considèrent pas l'effet du stress thermique sur le développement et la croissance des cultures.

En se basant sur ces deux critères, les modèles Daisy, DSSAT et WOFOST n'ont donc pas été retenus pour cette étude.

2.3.3. Cultures et conditions environnementales

Comme discuter dans le premier chapitre, section 1.1, l'agriculture pluviale méditerranéenne est caractérisée par une dominance des cultures annuelles (céréales, légumineuses, fourrages), des vignobles et des vergers. Contrairement aux vignobles et aux vergers, les cultures annuelles sont caractérisées par des systèmes racinaires plus courts, les rendant ainsi plus vulnérables au manque d'eau dans la zone racinaire. Pour cette raison, nous nous focalisons dans cette étude sur ces cultures.

En se basant sur la littérature, nous avons établi une liste de cultures annuelles représentatives des agrosystèmes pluviaux méditerranéens appartenant aux familles des céréales, des légumineuses et des fourrages. Nous avons ensuite sélectionné les cultures les plus importantes dans chaque famille selon la FAO (2022). Une fois les cultures méditerranéennes dominantes fixées, nous avons identifié celles dont les modèles retenus à l'étape précédente peuvent simuler le fonctionnement. Le Tableau 2.4 liste les cultures méditerranéennes pluviales identifiées, ainsi que les cultures non simulées par les modèles retenus. Le modèle de culture choisi doit être aussi capable de simuler le fonctionnement des agrosystèmes pluviaux méditerranéens. De ce fait, nous avons vérifié l'adaptabilité des cinq modèles restants aux conditions environnementales méditerranéennes, en vérifiant s'ils avaient ou non été utilisés en région méditerranéenne par ailleurs dans la littérature.

L'analyse du Tableau 2.4 montre que les cinq modèles retenus à l'étape précédente sont capables de simuler la majorité des cultures fixées préalablement, et qu'ils sont tous utilisés en région méditerranéenne. De ce fait, cette étape, basée sur les critères cultureux, ne permet aucune exclusion de modèle.

Tableau 2.4 : Panel de cultures méditerranéennes non simulées par les modèles de cultures retenus et utilisation en région méditerranéenne.

Cultures méditerranéennes pluviales		Cultures <u>non simulées</u> par les modèles de cultures				
Familles	Cultures	APSIM	AquaCrop	CropSyst	EPIC	STICS
Céréales	Blé, orge, avoine	Avoine	-	-	-	-
Légumineuses	Fève, pois chiche, petit pois	-	Petit pois	-	-	Fève, pois chiche
Fourrages	Vesce, fenugrec	Vesce, fenugrec	Fenugrec	Fenugrec	Fenugrec	Fenugrec
Utilisation en région méditerranéenne		×	×	×	×	×

2.3.4. Complexité et caractéristiques techniques

La dernière étape dans le choix du modèle de culture consiste à analyser la complexité des modèles (nombre de paramètres d'entrée), ainsi que leurs caractéristiques techniques en termes de disponibilité du code, du langage informatique et de la façon avec laquelle le code a été écrit (Tableau 2.5). En effet, plus le nombre de paramètres d'entrée du modèle est important, plus sa spatialisation (grain parcellaire sur une extension spatiale de l'ordre du bassin versant) est difficile. Les caractéristiques techniques du modèle renseigneront sur la possibilité du couplage et de l'implémentation du modèle dans une plateforme de spatialisation.

Tableau 2.5 : Complexité et caractéristiques techniques.

Modèles	Disponibilité du code	Langage	Nombre de variables d'entrée
APSIM	Disponible		≈ 292
AquaCrop	Disponible	R et MATLAB	≈ 70
CropSyst	Disponible sur demande	C++	≈ 50
EPIC	Disponible	FORTRAN 90	> 200
STICS	Disponible	FORTRAN 77	≈ 170

Le Tableau 2.5 montre qu'à l'exception de CropSyst et de STICS pour lesquels le code n'est disponible que sur demande, les codes d'APSIM, d'AquaCrop et d'EPIC sont disponibles en accès libre sur internet.

En raison du nombre important de leurs paramètres d'entrée, compliquant notamment leur spatialisation, les modèles APSIM, EPIC et STICS ont été écartés. Les deux derniers modèles retenus sont donc AquaCrop et CropSyst, caractérisés par un nombre réduit de paramètres d'entrée et par des langages couramment utilisés dans la communauté scientifique (C++ pour CropSyst et R ou Matlab pour AquaCrop).

Les deux modèles AquaCrop et CropSyst présentent quelques points communs (Dhakar et al., 2018), parmi lesquels nous pouvons citer : (1) des performances approuvées en région méditerranéenne à la fois pour l'agriculture irriguée et pluviale (Abi Saab et al., 2015, 2021 ; Montoya et al., 2018; Mazhoud et al., 2022; Sandhu et Irmak, 2019), (2) le rendement de la culture est calculé en fonction de la biomasse et de l'indice de récolte (HI pour *harvest index*) et (3) stress hydrique affectant le rendement via HI. En comparant les performances d'AquaCrop, CropSyst et WOFOST à simuler la croissance du tournesol sous différents régimes hydriques en Méditerranée, Todorovic et al. (2009) n'ont signalé aucune différence de performance entre les trois modèles, malgré leurs différents degrés de complexité. Contrairement à ces auteurs, Abi Saab et al. (2015) ont montré qu'AquaCrop est légèrement plus performant que CropSyst à simuler la croissance et la production de l'orge, dans le sud de l'Italie. Ces auteurs expliquent leurs résultats par le fait que (1) les paramètres de la culture dans AquaCrop sont plus faciles à estimer, à partir de données facilement mesurables, par rapport à ceux de CropSyst ; (2) l'effet du stress hydrique est mieux décrit dans AquaCrop en ajustant HI à l'humidité du sol avant et pendant la floraison, ainsi que pendant la phase de la formation des graines ; (3) l'utilisation d'une fonction de stress hydrique prenant en compte la croissance du couvert végétal, la fermeture stomatique et la sénescence permet une meilleure performance; (4) dans CropSyst, l'effet du stress hydrique sur la croissance et la production végétale est combiné à celui du rayonnement solaire et de l'apport en azote. Cette prise en compte de l'effet des différents stress est plus adaptée en région humide, où la croissance et la production de la culture sont gouvernées par les trois facteurs. Cependant, dans les régions semi-arides, où la croissance et la production végétale sont principalement limitées par l'eau, CropSyst est moins adapté (Kanda et al., 2018).

En tenant compte de tous les points discutés ci-dessus, nous avons décidé de sélectionner le modèle de culture AquaCrop pour la présente étude.

3. Présentation d'AquaCrop

AquaCrop est un modèle de culture simple, développé par la FAO et ayant comme objectif principal la simulation de la biomasse et du rendement des cultures, en considérant l'eau comme le moteur principal du fonctionnement végétal (Kanda et al., 2018). Fonctionnant à un pas de temps journalier, AquaCrop simule les échanges d'eau (ETa, R, DP, Infl, CR) entre les différentes composantes du continuum sol-plante-atmosphère, ainsi que la croissance et la production végétale. La Figure 2.2 schématise la relation entre les différents compartiments considérés dans AquaCrop, ainsi que les principales variables simulées par le modèle.

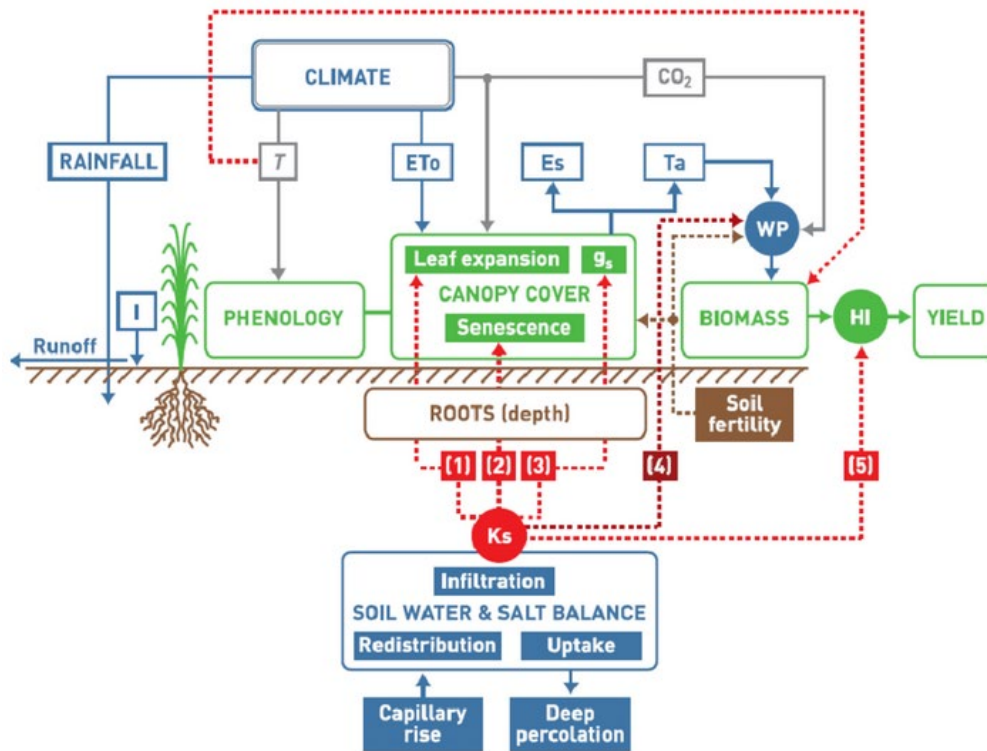


Figure 2.2 : Schéma représentatif du fonctionnement d'AquaCrop (manuel d'utilisation d'AquaCrop).

AquaCrop représente le sol sous la forme d'un réservoir divisé en horizons (5 horizons maximum). Chaque horizon est caractérisé par une profondeur, une texture et des propriétés hydrodynamiques : teneur en eau à la capacité au champ (FC), teneur en eau au point de flétrissement permanent (PWP), teneur en eau à saturation (Sat), conductivité hydraulique à

saturation (K_{sat}) et coefficient de drainage (τ). Le modèle reconnaît toutes les classes texturales du triangle de l'USDA (Steduto et al., 2009). Les propriétés hydrodynamiques de chaque horizon sont ensuite calculées en utilisant des fonctions de pédotransfert (Saxton et Rawls, 2006). L'utilisateur a aussi la possibilité de renseigner directement les propriétés hydrodynamiques de chaque horizon. Pour calculer finement les flux d'eau dans le sol, AquaCrop divise le profil du sol en compartiments (12 compartiments maximum) d'épaisseurs variables (par défaut 0.1 m) (Figure 2.3). La texture et les propriétés hydrodynamiques de chaque compartiment sont celles de l'horizon auquel il appartient.

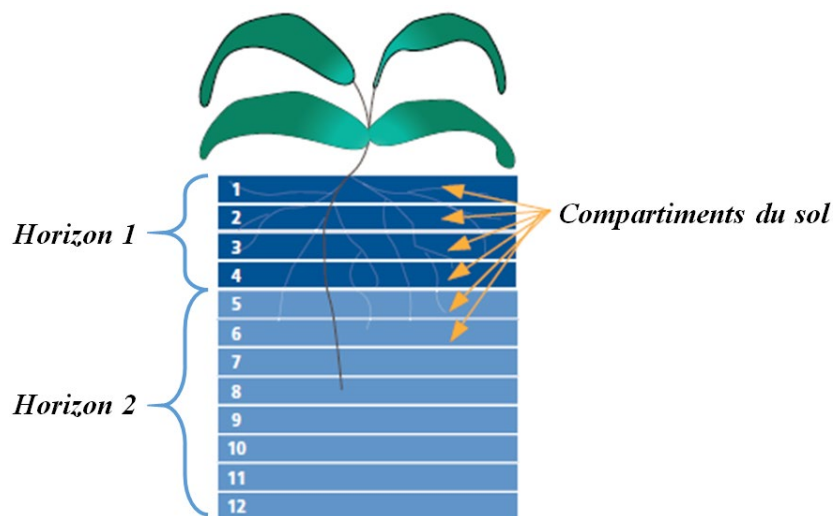


Figure 2.3 : Schéma représentatif du sol dans AquaCrop. Dans cette représentation, le sol est discrétisé en 12 compartiments répartis sur deux horizons, de profondeurs différentes.

AquaCrop simule la croissance et le développement de nombreuses cultures annuelles, classées en cultures fruitières ou à grain, racines et tubercules, légumes à feuilles et cultures fourragères. La croissance du couvert végétal est décrite par le taux de couverture végétale (CC) au lieu de l'indice foliaire (LAI) comme utilisé dans la plupart des modèles de culture. Le taux de couverture végétale est décrit par quatre paramètres : le taux de couverture initial (CC_0), le coefficient de croissance végétale (CGC), le taux de couverture maximal (CC_x) et le coefficient de déclin du couvert végétal (CDC). Chaque culture est décrite par deux types de paramètres. Les premiers sont des paramètres dit *conservatifs*, qui ne changent pas selon les variétés, les pratiques agricoles et le climat (e.g., température de base, CC_0 , CC_x , CGC, CDC). Le deuxième type de paramètres correspond aux paramètres dit *non conservatifs*, qui doivent être ajustés en fonction de la variété et des conditions environnementales. Ces paramètres décrivent les différents stades phénologiques de la culture, du semis à la maturité. La Figure 2.4 schématise

l'évolution temporelle du couvert végétal (CC) telle que formalisée par AquaCrop. Pour exprimer les différents stades phénologiques de la culture, AquaCrop offre la possibilité de les renseigner soit en nombre de jours, soit en temps thermique (GDD).

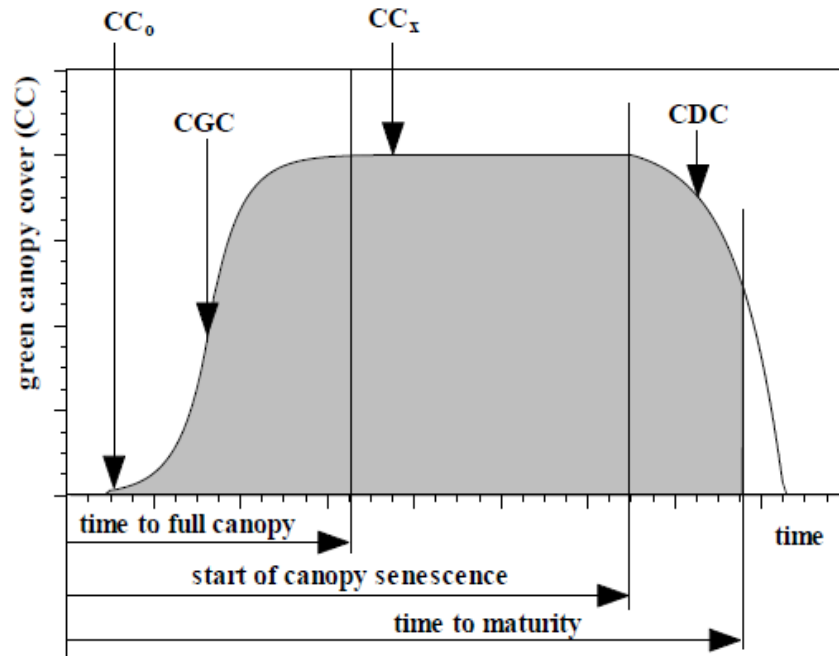


Figure 2.4 : Évolution temporelle du taux de couverture végétale (CC) (Manuel d'utilisation d'AquaCrop). CC_0 et CC_x représentent le taux de couverture initial et le taux de couverture maximal, respectivement. CGC et CDC représentent le coefficient de croissance végétale et le coefficient du déclin du couvert végétal, respectivement.

Le modèle calcule séparément l'évaporation du sol (E_s) (Équation 2.1) et la transpiration (Tr). Cette spécificité lui permet de quantifier la quantité d'eau non utilisée par la plante (Steduto et al., 2009), perdue par évaporation. Le modèle calcule Tr en fonction de CC et d' ET_0 selon l'équation 2.3 ; la biomasse aérienne sèche (AGB) est ensuite déterminée en fonction de Tr et de la productivité de l'eau normalisée (WP^*) prenant en compte la concentration en CO_2 atmosphérique (Équation 2.4). La normalisation de WP permet au modèle d'être appliqué dans des contextes de climats futurs en lien avec les précipitations, la température de l'air, la demande évaporative et la concentration en CO_2 . Le rendement (Yld) est calculé en multipliant la biomasse par l'indice de récolte HI (Équation 2.5).

$$E_s = Kr [(1 - CC^*)Ke_x] ET_0 \quad (2.1)$$

$$CC^* = 1.72CC - CC^2 + 0.3CC^3 \quad (2.2)$$

$$Tr = K_s K_{STr} [CC^* K_{c_{Tr,x}}] ET_0 \quad (2.3)$$

$$AGB = WP^* \sum \frac{Tr}{ET_0} \quad (2.4)$$

$$Yld = HI \cdot AGB \quad (2.5)$$

avec :

- K_r : coefficient de réduction de l'évaporation
- K_{e_x} : coefficient d'évaporation maximale
- CC^* : taux de couverture végétale ajusté pour les effets micro-advectifs. La micro-advection diminue E_s (E_s inférieur à $(1-CC)$)
- K_s : coefficient de stress hydrique
- K_{STr} : coefficient de stress de froid
- $K_{c_{Tr,x}}$: coefficient de transpiration maximal
- HI : indice de récolte
- WP^* : productivité de l'eau normalisée pour prendre en compte la concentration en CO_2 atmosphérique

Le calcul du bilan hydrique du sol se fait à l'échelle de chaque compartiment. AquaCrop calcule les composantes du bilan hydrique dans l'ordre suivant : percolation, ruissellement, infiltration, remontée capillaire, évaporation et transpiration (Figure 2.5). Chaque composante du bilan hydrique est calculée pour chaque compartiments avant de passer à la composante suivante. Cela signifie qu'AquaCrop calcule la percolation pour chaque horizon avant de calculer l'infiltration. L'infiltration du premier compartiment correspond à la différence entre la quantité d'eau apportée par l'irrigation et par la pluie et le ruissellement tandis que l'infiltration des compartiments inférieurs correspond à la percolation du compartiment situé juste au-dessus. Une fois la remontée capillaire calculée, AquaCrop calcule la quantité d'eau perdue par évaporation et transpiration. L'évaporation n'est calculée que dans les compartiments supérieurs du sol, par défaut compris dans les 30 premiers centimètres. La transpiration n'est calculée que dans les compartiments contenant des racines. L'humidité totale du sol correspond à la moyenne pondérée de l'humidité de chaque compartiment.

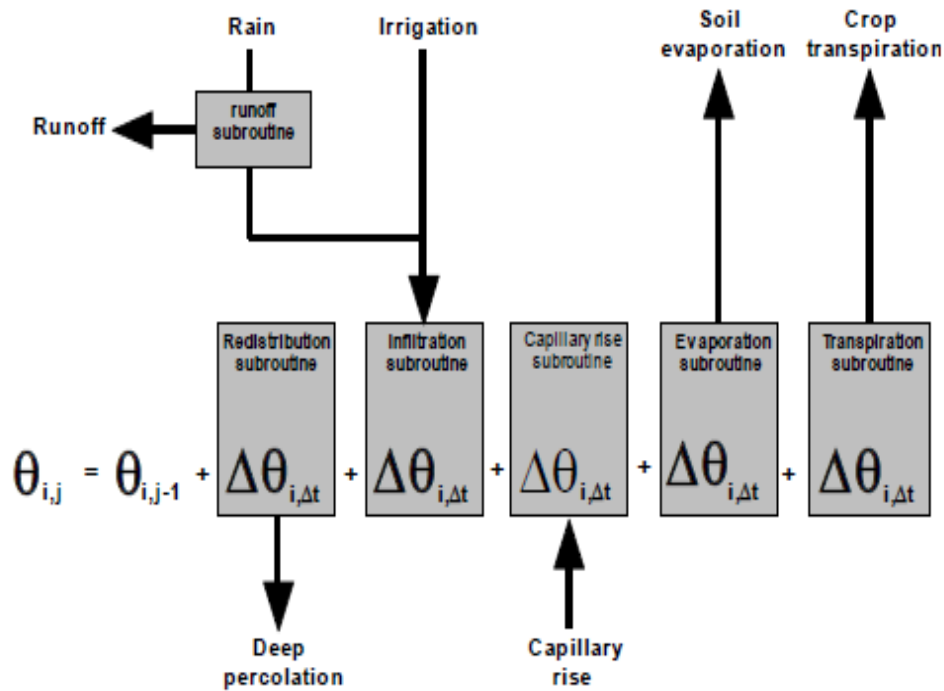


Figure 2.5 : Étapes de calcul du bilan hydrique dans chaque compartiment i du sol.

AquaCrop détermine la quantité d'eau infiltrée dans les premières couches du sol, la distribution d'eau entre les différents compartiments du sol ainsi que la percolation d'eau vers l'aquifère en calculant la capacité de drainage ($\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t}$, exprimée en mm). Cette dernière est exprimée, selon l'équation 2.6, en fonction du coefficient de drainage (τ), de l'humidité actuelle du sol (θ_i , exprimée en m^3m^{-3}), de l'humidité du sol à saturation (Sat , exprimée en m^3m^{-3}) et de l'humidité du sol à la capacité au champ (FC , exprimée en m^3m^{-3}). Le coefficient de drainage τ est calculé en fonction de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) selon l'équation 2.7. La quantité d'eau percolée entre deux compartiments du sol est décrite selon l'équation 2.8 en fonction de la capacité de drainage ($\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t}$), de la profondeur du compartiment Δz_i (exprimé en mm) et du pas de temps Δt (un jour).

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau (Sat - FC) \frac{e^{\theta_i - FC} - 1}{e^{Sat - FC} - 1} \quad (2.6)$$

$$\tau = 0.0866 K_{sat}^{0.35} \quad (2.7)$$

$$D_i = 1000 \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} \Delta z_i \Delta t \quad (2.8)$$

Dans AquaCrop, la quantité d'eau perdue par ruissellement (R , exprimé en mm) est calculée par la méthode du *curve number* (CN) (Boughton, 1989) selon l'équation 2.9. Dans cette équation, P désigne la pluviométrie (exprimée en mm), I_a (exprimée en mm) représente la quantité d'eau qui peut s'infiltrer avant que le ruissellement ne se produise (Équation 2.11), exprimée en mm. S (exprimée en mm) représente le potentiel maximum de rétention d'eau dans le sol, calculé selon l'équation 2.10. Le CN est un paramètre qui dépend (1) de la nature du couvert végétal (e.g., culture en rang, culture couvrante), (2) des pratiques agricoles pouvant influencer les conditions hydrologiques du sol (e.g., les terrasses), (3) du groupe hydrologique du sol, en lien avec le taux d'infiltration du sol et (4) des conditions d'humidité antérieures du sol, en lien avec la pluie antécédente, calculée sur cinq jours.

$$R = \frac{[P - I_a]^2}{P + S - I_a} \quad (2.9)$$

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.10)$$

$$I_a = 0.05 S \quad (2.11)$$

Dans AquaCrop, la croissance végétale des cultures peut être affectée par 4 types de stress : stress hydrique, stress thermique, stress de fertilisation et stress de salinité de l'eau. L'impact de ces différents stress est décrit par des coefficients de stress K_s variant de 1 (absence de stress) à zéro (stress total). Selon le type de stress, les paramètres cibles du modèle changent. À titre d'exemple, le stress hydrique affecte l'expansion foliaire et CC, l'expansion de la zone racinaire, la transpiration et l'indice de récolte, tandis que le stress thermique n'impacte que la transpiration et l'indice de récolte.

Pour résumer, AquaCrop est donc un *water driven model* parcimonieux, unidimensionnel, et à pas de temps journalier. Les principales variables simulées par le modèle sont relatives à la croissance et à la production végétale (taux de couverture végétale, croissance racinaire, biomasse aérienne sèche et rendement) et au bilan hydrique (humidité du sol, ruissellement, infiltration, percolation, remontées capillaires, évaporation du sol et transpiration). Les paramètres du modèle sont constitués des paramètres liés à la culture (paramètres conservatifs, fixes pour une espèce donnée, et paramètres non conservatifs, variant selon les cultivars), au sol (nombre d'horizons, texture et paramètres hydrodynamiques), à la nappe phréatique (présence et profondeur). Les variables de forçage du modèle sont les variables

météorologiques : ET_0 , température, pluie et concentration en CO_2 . Les pratiques culturales concernent les dates de semis, de fertilisation et d'irrigation. Enfin les conditions initiales du modèle sont représentées par les humidités pour chaque horizon d sol. Des présentations détaillées d'AquaCrop sont proposées par Steduto et al. (2009) ; Raes et al. (2009) et sont disponibles en ligne (<https://www.fao.org/aquacrop/en/>).

4. Site d'étude et données existantes

Nous consacrons cette section à la présentation du site d'étude et des données existantes. Nous commençons par discuter les critères du choix du site d'étude et présenter des caractéristiques générales de ce site. Nous passons ensuite à la présentation détaillée de la base de données dont nous disposons préalablement au commencement de la thèse, et nous finissons par discuter quelques caractéristiques spécifiques du site d'étude qui nous serviront plus tard, que ce soit pour le dimensionnement des plans d'expériences numériques ou pour l'analyse des résultats.

4.1. Site d'étude

4.1.1. Critères de choix du site d'étude

Le site d'étude choisi doit répondre à un ensemble de critères en termes de climat, de topographie et de représentativité des systèmes agricoles méditerranéens. Le site d'étude doit être localisé dans une région caractérisée par un climat semi-aride et un relief collinaire (topographie caractéristique de la Méditerranée et propice au ruissellement). Il doit aussi être représentatif des systèmes agricoles méditerranéens. Comme discuté dans le premier chapitre, l'agriculture méditerranéenne est dominée par le système pluvial avec un mélange entre production agricole et élevage. Cette agriculture est caractérisée par un large panel de cultures, avec une dominance de céréales, légumineuses, fourrages, ainsi que l'arboriculture telle que les oliviers. Un autre critère indispensable au choix du site est l'existence d'observations acquises sur une longue période et rassemblées dans une base de données riche, pour la réalisation de notre expérimentation numérique et sa validation.

Nous travaillons dans la présente étude sur le bassin versant de Kamech, situé au nord-est de la Tunisie. Kamech est l'un des deux sites d'étude de l'Observatoire de Recherches en Environnement OMERE « Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau » (<https://www.obs-omere.org/>, Molénat et al. (2018)) géré par l'équipe encadrante de la thèse depuis une vingtaine d'années. En plus de sa représentativité de l'agriculture méditerranéenne en termes de climat, de topographie, de système agricole (polyculture-élevage) et de cultures

dominantes, nous disposons à Kamech 1) d'une base de données riche nécessaire à notre travail et 2) de travaux antérieurs décrivant le fonctionnement des cultures et le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

4.1.2. Présentation générale du bassin de Kamech

Appartenant au bassin versant du Lebna (218 km²), le bassin versant de Kamech est situé au nord-est de la Tunisie, sur la péninsule du Cap-Bon. Il est drainé par l'oued el Gamh, et s'étend entre les coordonnées géographiques 10°52'-10°53'E et 36°52'-36°53'N, avec une altitude moyenne de 108 m au-dessus du niveau de la mer (Figure 2.6).

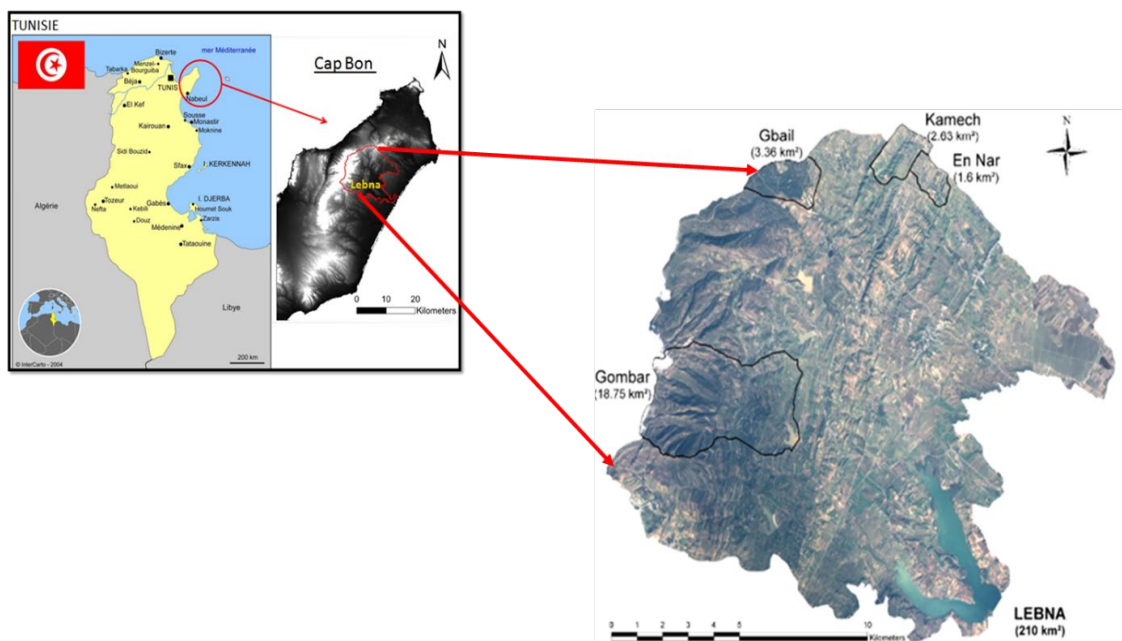


Figure 2.6 : Localisation de Kamech au sein du bassin versant de Lebna.

Kamech est caractérisé par sa représentativité des conditions climatiques et culturelles de la région du Cap-Bon (relief collinaire, couvert végétal avec dominance des cultures céréalières et parcellaire fragmenté de petite superficie) et de l'agriculture pluviale méditerranéenne d'une manière plus générale. 70% de sa superficie totale est agricole, avec une variabilité spatio-temporelle importante de l'occupation du sol et une hétérogénéité spatiale des types de sol (Mekki, 2003) (Figure 2.7). Le bassin versant est aussi caractérisé par un système associant à la fois l'agriculture et l'élevage (Figure 2.7). Ce type d'association est adopté par la majorité des agriculteurs du bassin versant et cela sur des petites parcelles, d'une superficie moyenne inférieure à 1 ha.

Kamech a fait l'objet de plusieurs projets de recherches, d'études et de travaux de thèses depuis les années 2000 (El Amami et al., 2018 ; Inoubli et al., 2017 ; Mekki et al., 2014, 2018a, 2018b ; Molénat et al., 2018 ; Zitouna-Chebbi, 2009 ; Zitouna-Chebbi et al., 2023) et ce grâce à la présence de l'observatoire mis en place depuis une vingtaine d'années. L'observatoire a en effet permis une caractérisation détaillée de ce petit bassin versant, comprenant notamment des cartes de sol, des cartographies des cultures et des pratiques agricoles, des suivis de végétation, des chroniques de mesures météorologiques et hydrologiques en différentes localisations (débits, niveaux de nappes superficielles, profils d'humidité du sol, mesures de ruissellement à l'échelle de la parcelle et du bassin versant), ainsi que des chroniques de flux surface-atmosphère, dont l'évapotranspiration réelle (Mekki et al. 2006, 2014 ; Molénat et al., 2018 ; Zitouna-Chebbi et al., 2012, 2015).

Kamech est un bassin versant agricole d'une superficie de 2.6 km². Il est caractérisé par un parcellaire très fragmenté, comprenant près de 273 parcelles, d'une taille moyenne de 0.62 ha. Le climat dans cette région est un climat méditerranéen semi-aride. La période pluvieuse s'étend du mois d'octobre au mois de mars (Mekki, 2003), avec une pluviométrie annuelle moyenne de 629 mm et une ET₀ annuelle moyenne de 1310 mm (moyenne sur 25 ans, entre 1995 et 2019). Kamech est aussi caractérisé par la présence d'une retenue collinaire à son exutoire (Figure 2.7) d'une capacité initiale à sa construction de 145 000 m³ (Mekki, 2003). Cette retenue est principalement construite pour protéger le grand barrage du Lebna contre le dépôt de sédiments par érosion hydrique, et pour servir à l'irrigation de quelques parcelles, situées en aval du bassin versant (Bouteffeha et al., 2015).

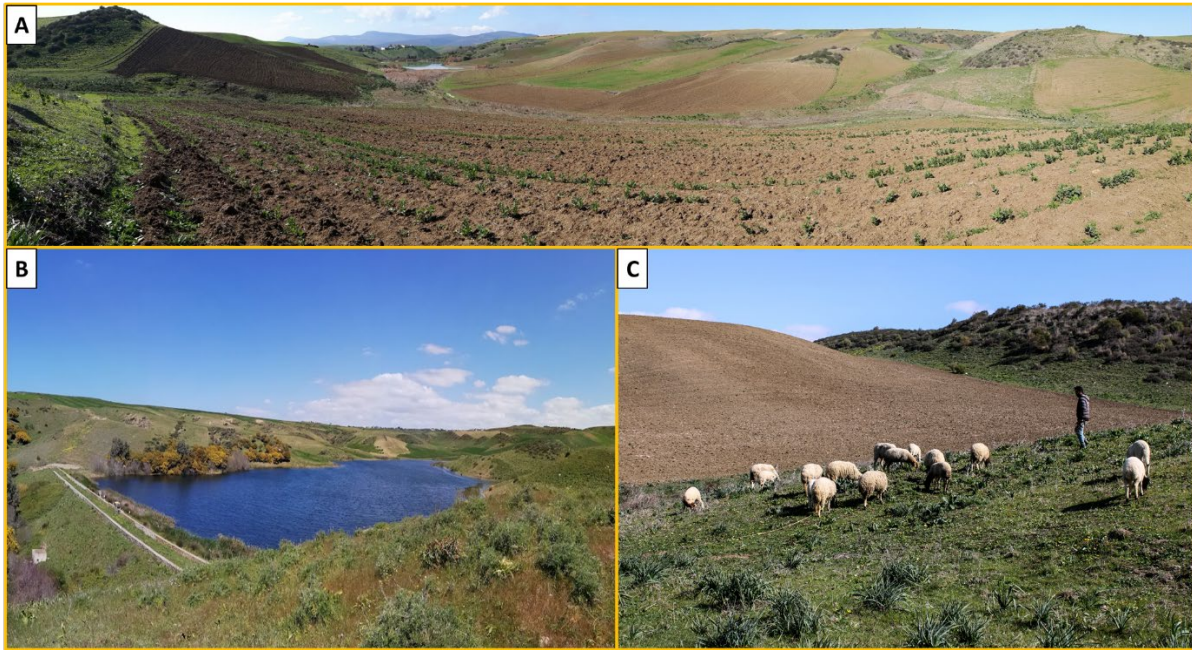


Figure 2.7 : *Kamech en quelques photos. (A) Vue panoramique de Kamech. (B) Retenue collinaire, située à l'exutoire du bassin versant. (C) Différents types de parcours existant à Kamech (parcours ligneux et parcours herbacés à base de végétation annuelle.*

Le relief est caractérisé par une dissymétrie entre la rive droite et la rive gauche (plus large) du bassin. Les altitudes varient entre 80 m et 200 m et les pentes entre 0% et 30% avec des pentes plus faibles sur la rive gauche et plus accentuées sur la rive droite, suivant le trajet de l'oued. Le substrat géologique à Kamech date du Miocène. Il est principalement constitué de marnes et d'argiles (Molénat et al., 2018). Les quatre sols dominants sont les Cambisols, Luvisols, Regosols et Vertisols, couvrant respectivement 46%, 26%, 18% et 10% de la superficie totale du bassin versant (Mekki et al., 2018b). La profondeur du sol varie de quelques millimètres à 2 m, avec des sols moins profonds sur les pentes les plus fortes.

Kamech est caractérisé par l'existence de différents systèmes de culture et de pâturage sous deux régimes différents, pluvial et irrigué. Les systèmes de cultures incluent les céréales, les légumineuses, l'arboriculture et le maraîchage, avec une dominance céréalière. En régime pluvial, on trouve le blé, l'orge et l'avoine comme céréales, le pois chiche, la fève et les petits pois comme légumineuses et la vesce et le fenugrec comme fourrages. En arboriculture on rencontre des oliveraies, des vignobles et d'autres arbres fruitiers. Les cultures irriguées sont localisées près de la retenue collinaire, en aval du bassin versant avec comme principales cultures les tomates et les piments. Ces cultures occupent une faible superficie, variant, selon la disponibilité de l'eau, de 3% à 6% de la superficie totale du bassin versant (Mekki, 2003).

4.2. Base de données existante

L'acquisition des données dans le cadre de l'activité d'OMERE, depuis une vingtaine d'années, repose sur trois principaux objectifs scientifiques (Molénat et al., 2018) à savoir : (1) identifier les moteurs naturels et anthropiques, à court et à long terme, des flux d'eau, d'érosion et des contaminants ; (2) évaluer de l'impact de l'activité anthropique (e.g., travail du sol, techniques de captage des eaux) à différentes échelles spatiales, de la parcelle au bassin versant, sur les dynamiques et les intensités des phénomènes d'érosion ; et (3) simuler la mise en place de nouveaux scénarios de gestion durable des systèmes agricoles méditerranéens par l'intermédiaire de la modélisation, spatialement distribuée, des flux d'eau, de sédiments et de contaminants, de la parcelle au bassin versant.

De ce fait, nous disposons d'une base de données très riche, avec des séries d'observations multi-décennales, comprenant des données météorologiques et hydrologiques, acquises grâce à l'installation de stations de mesures pérennes ou temporelles (station météorologique, tour à flux, séries de pluviographes et de pluviométrie) (Figure 2.8). Cette base de données contient aussi de nombreux jeux de données concernant d'autres types de mesures, telles que l'humidité du sol, le suivi de la croissance et du développement des cultures, etc. Dans ce cas, chaque jeu de données correspond à une année hydrologique (de septembre année [n-1] à août année [n], pour une année n donnée), une parcelle, et une culture.

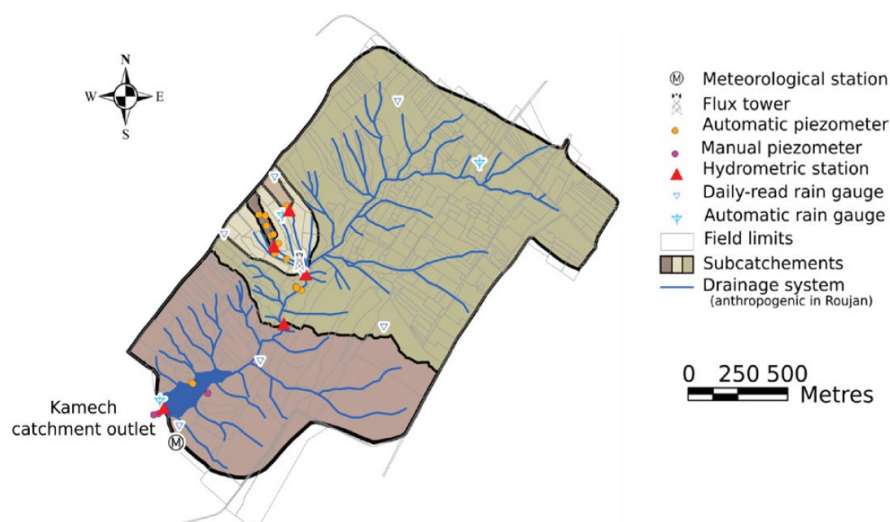


Figure 2.8 : Localisation des différents instruments hydrométéorologiques au sein du bassin versant de Kamech (Molénat et al., 2018).

Une brève description des données disponibles est donnée ci-dessous. Les jeux de données utilisés dans ce travail de thèse sont décrits en détails dans le chapitre 3 et le chapitre 4.

4.2.1. Données climatiques et micro-météorologiques

Pluviométrie

Pour mesurer les précipitations en continu, Kamech est équipé d'une série de pluviographes et pluviomètres, installés en différentes localisations au sein du bassin versant, à son exutoire et au niveau des parcelles (Figure 2.8). Les pluviographes sont à augets basculeurs avec une résolution temporelle de 0.5 mm, alors que les pluviomètres sont à lecture directe.

L'analyse des données existantes montre que la pluviométrie est caractérisée par une forte variabilité intra et inter annuelle, ainsi que par une forte variabilité spatiale. Durant la période comprise entre 1995 et 2019, les cumuls annuels de pluies ont varié entre 394 mm et 1036 mm. L'analyse des pluies mensuelles sur cette période a montré que les mois les plus secs sont les mois de juin, juillet et août, avec une pluviométrie mensuelle inférieure à 10 mm, et le mois le plus humide est le mois de novembre avec un cumul mensuel moyen supérieur à 90 mm (Figure 2.9). La pluviométrie est aussi spatialement variable : Mekki (2003) a observé un écart de 20% par rapport à la moyenne annuelle entre les différents pluviomètres et pluviographes du bassin versant.

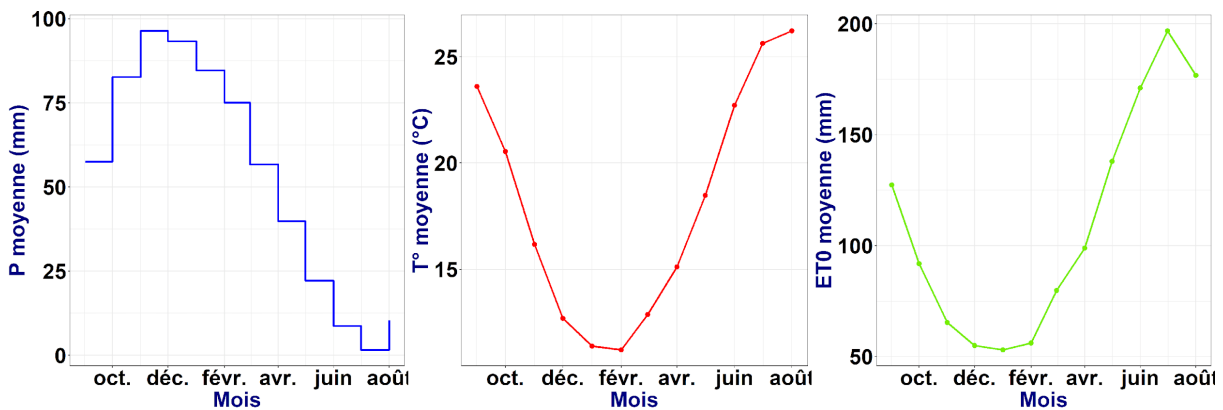


Figure 2.9 : Évolution temporelle des pluies (P , mm), de la température de l'air (T , °C) et de l'évapotranspiration de référence (ET_0 , mm) mensuelles moyennes sur 25 ans, entre 1994 et 2019.

Météorologie et flux surface-atmosphère

Le bassin versant est équipé de deux stations de mesures pérennes, la station météorologique et la tour à flux. Des stations de mesure de flux ont aussi été installées temporairement dans plusieurs parcelles, localisées en différents endroits du bassin versant.

La station météorologique a été installée en 1994 à proximité de l'exutoire du bassin versant (36°52'10.5'' N, 10°52'6.3'' E, 108 m asl). Installée à une hauteur de 2 m de la surface du sol, elle mesure avec une fréquence de 1 Hz et un pas de temps de sortie de 30 min la température et l'humidité de l'air, le rayonnement solaire (rayonnement global, capteur installé à 1 m de hauteur), ainsi que la vitesse et la direction du vent.

La tour à flux a été installée en 2010 au centre du bassin versant (36°52'39.0'' N, 10°52'36.40'' E, 115 m asl.). Installée à 9.6 m au-dessus de la surface du sol, elle mesure par la méthode des covariances turbulentes les différentes variables permettant le calcul des flux surface-atmosphère. Elle mesure à un pas de temps de 20 Hz la vitesse du vent dans les trois directions, la température de l'air, la concentration en vapeur d'eau (humidité) et en CO₂ atmosphérique. Les flux de chaleur sensible et de chaleur latente (évapotranspiration réelle) sont calculés à un pas de temps de 30 minutes. Zitouna-Chebbi et al. (2018) décrivent en détail les différents capteurs et types de mesures au niveau des deux stations, ainsi que les méthodes de correction des données.

Les températures sont caractérisées par une variation interannuelle plus faible que celle des pluies. La température moyenne mensuelle sur 25 ans varie de 11 °C en janvier-février à 26 °C en août (Figure 2.9). La variabilité spatiale de la température de l'air est très faible. En comparant les mesures au niveau de la station météorologique avec d'autres mesures, à différents endroits du bassin versant, Zitouna-Chebbi (2009) a constaté des différences faibles (de l'ordre de 0.1 °C) entre les mesures, avec des R² très proches de 1.

Les données de température et d'humidité de l'air, ainsi que la vitesse du vent mesurées au niveau des différentes stations de mesure sont utilisées dans le calcul de ET₀ selon la formule de Penman-Monteith décrite dans le document FAO-56. Comme pour la température, la variabilité interannuelle de l'ET₀ est faible. Les cumuls moyens mensuels varient de 53 mm à 197 mm. Les cumuls les plus faibles sont observés entre décembre et février et les cumuls les plus importants sont observés durant le mois de juillet (Figure 2.9).

4.2.2. Données de végétation

Pour les données de végétation, nous disposons de cartes d'occupation du sol, des mesures de la hauteur végétale, de l'indice foliaire (LAI), du taux de couverture végétale (CC) et de la biomasse aérienne sèche (AGB), ainsi que des données décrivant les stades phénologiques des cultures, issues de la littérature.

Indice foliaire et taux de couverture végétale

Pour le LAI, nous disposons, selon l'année de suivi, de deux types de mesure : des mesures par planimétrie et d'autres par photos hémisphériques. Pour les données de CC, nous disposons de mesures réalisées par estimation visuelle (années 2001 et 2002) et de données photos hémisphériques, elles aussi traitées par le logiciel CAN-EYE.

La fréquence de mesure de CC ou de LAI varie d'un cycle cultural à un autre et d'une culture à une autre. Pour les mesures par planimètre, 10 échantillons sont prélevés par date de mesure, à différentes localisations de la parcelle. Pour les mesures par photos hémisphériques, entre 10 et 15 photos sont prises par date de mesure, d'une manière aléatoire au sein de la parcelle. Ces photos sont collectées par un appareil type *fish-eye* et traitées par le logiciel CAN-EYE (Weiss et al., 2008). Lors de la prise des photos, le photographe doit maintenir l'appareil à l'horizontal, en veillant que son ombre soit perpendiculaire à son corps, pour minimiser la surface couverte par son ombre et en choisissant une orientation qui minimise l'exposition au rayonnement solaire, afin d'éviter le risque de sous-estimation des mesures.



Figure 2.10 : Protocole de prise des photos hémisphériques (Boukari, 2017).

Étant donné qu'AquaCrop utilise CC pour décrire la croissance du couvert végétal, nous avons converti les données de LAI en CC via une fonction basée sur la loi de Beer-Lambert,

couramment utilisée dans la littérature (Jeuffroy et Ney, 1997; Nielsen et al., 2012; Pereira et al., 2015; Trombetta et al., 2016). Le détail de cette équation, ainsi que les étapes de conversion sont décrits en détail dans le chapitre 3.

Biomasse aérienne sèche

La biomasse aérienne sèche est déterminée par une méthode destructive, basée sur l'échantillonnage et la pesée de la biomasse avant et après séchage. La fréquence de mesure et l'échantillonnage spatial varient selon le cycle cultural et l'année d'étude.

Stades phénologiques

Pour ce travail, quatre cultures d'intérêts ont été retenues pour (1) leur représentativité des cultures pluviales méditerranéennes, (2) leurs cycles phénologiques différents et (3) leurs différentes fonctions (e.g., production pour la consommation humaine, fourrage pour la consommation animale). Ces cultures sont le blé et l'orge comme céréales à grain, l'avoine comme fourrage et la fève comme légumineuse.

La Figure 2.11 représente les principaux stades phénologiques du blé, de l'orge et de la fève, exprimés en degrés-jour (GDD). Cette figure montre que les deux céréales, blé et orge, présentent deux cycles phénologiques semblables, avec comme seule différence un léger retard de maturation chez le blé par rapport à l'orge. Pour décrire le cycle phénologique de l'avoine, et en absence d'observations, nous avons utilisé les paramètres phénologiques du blé. Le cycle phénologique de la fève est très différent de celui du blé et de l'orge, avec des phases de croissance beaucoup plus courtes.

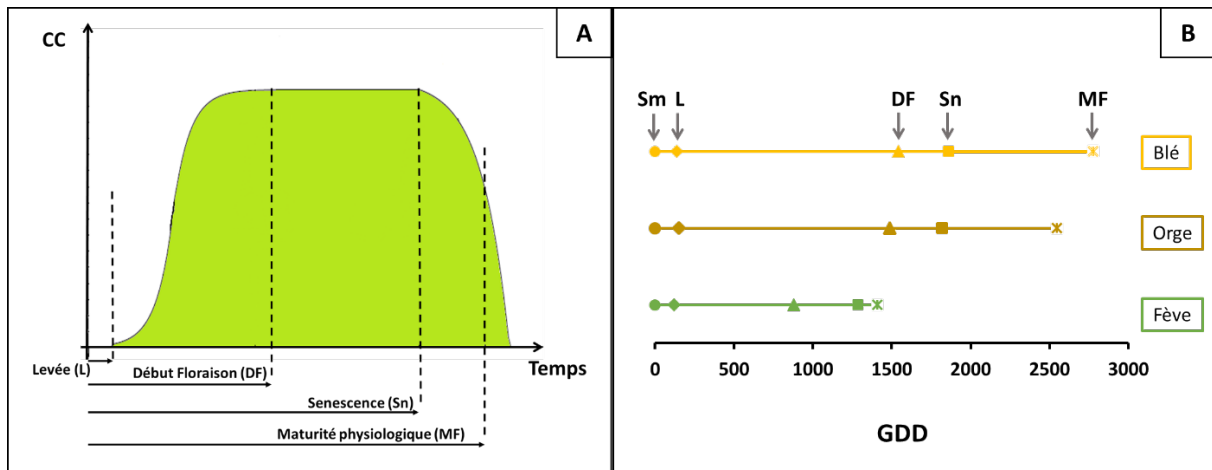


Figure 2.11 : Cycles phénologiques des cultures étudiées. La figure A représente les différents stades tels qu'ils sont représentés dans AquaCrop, en fonction du taux de couverture végétale (CC). La figure B représente la durée des différents stades pour chaque culture, exprimés en degré-jour (GDD). Sm, L, DF, Sn et MF désignent le semis, la levée, le début de floraison, la sénescence et la maturation physiologique, respectivement.

4.2.3. Données pédologiques

Pour les données de sol, il existe des cartes de sols et de profondeur. Nous disposons d'un ensemble de données issues de fosses pédologiques réalisées à différentes localisations dans le bassin versant (Coulouma et al., 2017). Ces fosses pédologiques fournissent des informations sur les propriétés physiques (texture, profondeur des différents horizons, pourcentage de cailloux, densité apparente, humidités caractéristiques, etc) et chimiques (pH, quantité d'azote, teneur en matière organique) des sols.

4.2.4. Données hydrologiques

Kamech dispose, depuis fin 2004, de quatre stations hydrologiques emboîtées, pour la mesure du ruissellement et de l'érosion. Comme le montre la Figure 2.12, ces stations de mesures sont localisées :

- à l'exutoire d'une parcelle expérimentale, située sur la rive droite du bassin versant et couvrant une superficie de 1.32 ha ;
- au niveau d'une ravine, située aussi sur la rive droite du bassin versant et alimentée par un impluvium d'une superficie de 1.37 ha ;
- au niveau d'un micro bassin versant, constitué principalement de parcelles cultivées, de parcours et d'un réseau de ravines et couvrant une superficie de 15.2 ha ;

- au niveau de l'oued, couvrant un sous-bassin versant d'une superficie de 175 ha et constituant le point de mesure des volumes d'eau et de sédiments entrant dans le lac collinaire.

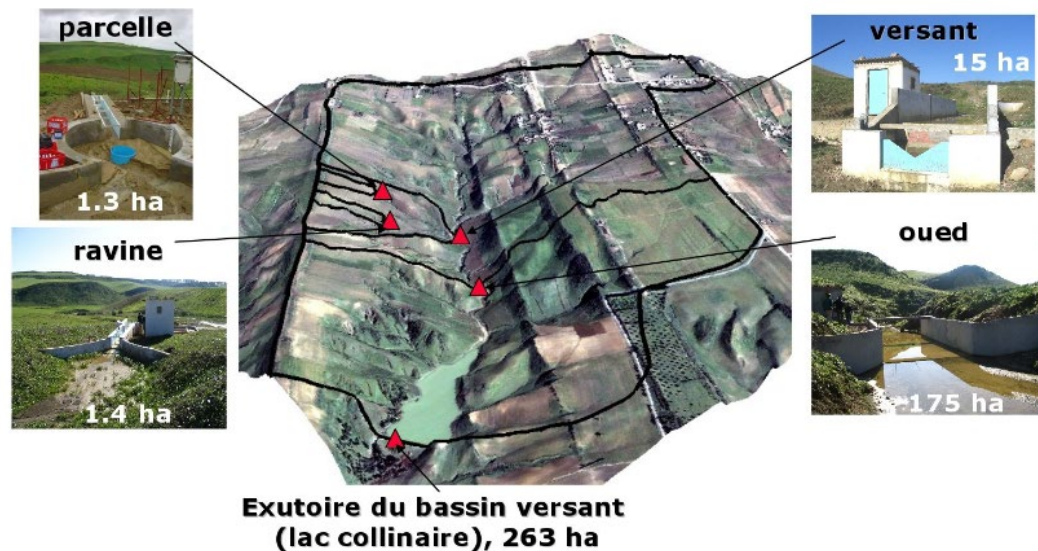


Figure 2.12 : Dispositif emboîté de stations hydrologiques sur Kamech (Hamdi et al., 2010)

Les différentes mesures collectées au niveau de ces quatre stations sont décrites en détail par Inoubli (2016). En plus de ces mesures de ruissellement et d'érosion, nous disposons de mesures d'humidité de sol obtenues sur des parcelles agricoles. Les mesures d'humidité du sol sont réalisées soit par la méthode gravimétrique, soit à l'aide de sondes neutroniques. Afin de prendre en compte sa variabilité spatiale, l'humidité est généralement mesurée à différents endroits de la parcelle (haut, milieu et bas de parcelle) avec une fréquence variable, selon la saison et le stade de développement de la culture. L'humidité est aussi mesurée à différentes profondeurs du sol, pour mieux décrire le profil vertical d'humidité du sol.

4.3. Caractéristiques du site d'étude

Nous présentons dans cette section quelques caractéristiques spécifiques de Kamech qui nous serviront par la suite, soit dans le dimensionnement des plans d'expériences numériques, soit dans l'analyse des résultats.

4.3.1. Dynamiques spatio-temporelle d'occupation du sol

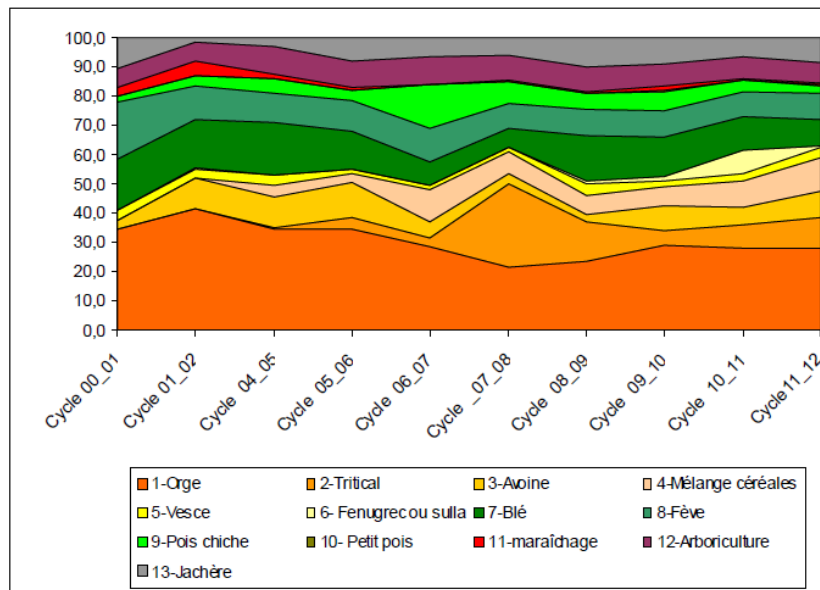


Figure 2.13 : Évolution interannuelle des proportions relatives des superficies dédiées à chaque culture à Kamech entre les années hydrologiques 2001 et 2012.

Comme mentionné dans la section 4.1.2, il existe à Kamech différents systèmes de cultures et de pâturages. La surface dédiée à chaque culture varie selon les années, avec une dominance des céréales à vocation mixte (principalement de l'orge) ou fourragère (Mekki et al., 2013). La superficie cultivée totale est globalement stable. La Figure 2.13 présente l'évolution interannuelle des superficies cultivées par cultures entre 2001 et 2012. Le système de rotation culturale est basé principalement sur les céréales (principalement fourragères), suivies généralement de légumineuses ou de jachère, ou rompre la succession (Mekki et al., 2013). Le deuxième système de rotation le plus observé est basé sur les parcours herbacés. La Figure 2.14 donne la répartition des classes de successions des cultures réalisée sur six années entre 1997 et 2002 (Mekki et al., 2013).

L'évolution paysagère, en termes de répartition spatiale et d'allocation des cultures, à Kamech, dépend de plusieurs facteurs dont les conditions naturelles et les conditions socio-économiques de la région.

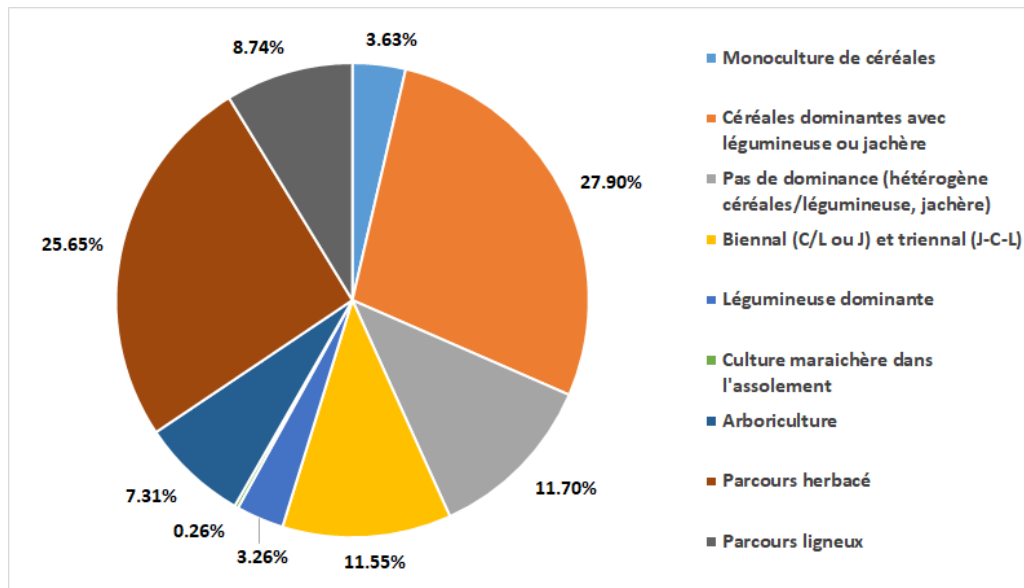


Figure 2.14 : Pourcentage de répartition de classes de rotation culturales entre 1997-2002.

Les facteurs naturels sont généralement liés à la topographie et la pédologie du bassin versant (Ben Mechlia et al., 1999; Mekki, 2003). En effet, les parcelles dont la pente est supérieure à 10% sont occupées par des parcours. L'absence des céréales sur ce type de parcelle s'explique par la difficulté du travail du sol en situation de relief. À l'inverse, la présence des parcours sur des pentes faibles s'explique par la présence de sols peu profonds et caillouteux (Mekki, 2003), peu propices à d'autres types de cultures à cause des faibles réservoirs utiles et à la difficulté du travail du sol.

Les facteurs socio-économiques sont généralement liés à la disponibilité de la main-d'œuvre, aux ressources financières et matérielles des agriculteurs et à la fragmentation du paysage (El Amami et al., 2018; Mekki et al., 2018a). Mekki et al. (2018a) ont montré dans une étude menée sur tout le bassin versant du Lebna que la fragmentation du parcellaire joue un rôle important sur l'allocation des terres et le choix des cultures annuelles à mettre en place. En effet, les agriculteurs possédant des parcelles isolées loin d'une route ou d'une piste, et dont l'accès passe forcément par les parcelles voisines, ne sont pas libres quant au choix des cultures. Ils sont obligés de s'organiser entre voisins et de synchroniser leurs calendriers culturaux afin de faciliter l'accès à la terre et son travail. Il est par exemple possible de trouver un regroupement de champs de légumineuses et d'épices car ces deux cultures sont toutes deux récoltées manuellement. Quant au regroupement des champs de blé, il est expliqué par la date de récolte qui se fait à la fin de saison.

4.3.2. Fentes de retrait et ruissellement

Selon les données disponibles et les dires d'experts, les sols de Kamech sont caractérisés par une abondance d'argiles gonflantes favorisant l'apparition des fentes de retrait. Ces fentes apparaissent à partir du mois de mars et disparaissent complètement en décembre (Mekki, 2003 ; Inoubli, 2016). Leur fermeture dépend fortement de la pluviométrie au début de la saison humide. Elles se ferment complètement avec un cumul de précipitation de l'ordre de 200 mm \pm 50 mm (Mekki, 2003). Les fentes de retrait influencent localement le bilan hydrique du sol en augmentant l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. La rétention des eaux de pluies par les fentes de retrait est comparable à celle d'un couvert végétal dense (Mekki, 2003). Une étude visant à évaluer la rétention hydrique des fentes montre, qu'à ouverture maximale, une fente peut stocker en moyenne 70 mm de pluie (Albergel et Nasri, 2001). La disparition en surface de ces fentes est possible suite à un labour du sol ou à un gonflement de surface de l'argile suite aux premières pluies. Cependant, elles continuent à exister en profondeur (Inoubli, 2016).



Figure 2.15 : Fente de retrait, observée à Kamech le 15 avril 2021.

À Kamech, le ruissellement dépend principalement de l'état de surface du sol. Cet état de surface se manifeste principalement par la présence ou non des fentes de retrait et des croûtes de battance, et par la densité du couvert végétal. La pente ne représente pas un facteur déterminant de ce processus (Mekki, 2003). Le ruissellement maximal est observé entre décembre et mars, période durant laquelle les fentes de retrait sont fermées (Mekki, 2003 ; Inoubli, 2016).

Chapitre 3 : Évaluation multicritère du modèle de culture AquaCrop dans un agrosystème méditerranéen pluvial collinaire

Le modèle de culture AquaCrop a été choisi pour étudier l'impact de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures, en lien avec la dynamique de l'eau dans le sol. Dans cette perspective, il est nécessaire de s'assurer préalablement des capacités d'AquaCrop à simuler ledit fonctionnement dans des conditions caractéristiques des agrosystèmes pluviaux méditerranéens, en relief collinaire. De ce fait, nous consacrons cette partie à l'évaluation multicritère du modèle AquaCrop à simuler le fonctionnement de quelques cultures caractéristiques de l'agriculture pluviale méditerranéenne, parfois peu étudiées avec AquaCrop, en conditions de reliefs collinaire, et ce en considérant plusieurs combinaisons de cultures et de sol, et plusieurs années hydro-climatiques contrastées. Cette évaluation multicritère est basée sur le taux de couverture végétale (CC), la biomasse aérienne sèche (AGB), l'évapotranspiration réelle (ET_a), le ruissellement (R) et le stock hydrique du sol (SWC).

Cette partie a fait l'objet d'un article à comité de lecture publié dans *Agricultural Water Management* en novembre 2022.

Référence : Dhoub, M., Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Molénat, J., Mekki, I., Jacob, F., 2022. Multicriteria evaluation of the AquaCrop crop model in a hilly rainfed Mediterranean agrosystem. *Agricultural Water Management* 273, 107912. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107912>

Résumé étendu de l'article

- **Contexte et objectifs**

L'utilisation des modèles de culture contribue à l'étude du fonctionnement des agrosystèmes pluviaux méditerranéens sur de grandes échelles spatio-temporelles, dans l'optique de proposer des modes de gestion durable en contexte de pressions anthropique et climatique. Cela nécessite le choix de modèles de cultures parcimonieux, capables de simuler de manière réaliste le fonctionnement de ces systèmes, tout en demandant un nombre faible de paramètres d'entrée, pour faciliter leur spatialisation. Ces modèles doivent être aussi capables de bien simuler le fonctionnement des cultures en conditions de stress hydrique, étant donné qu'en régions semi-arides et arides, l'eau est le principal facteur limitant la croissance et le développement des cultures.

Parmi les modèles existant dans la littérature, le modèle de la FAO AquaCrop semble être celui répondant le mieux aux critères mentionnés ci-dessus (chapitre 2). En effet, AquaCrop est un modèle de culture (1) offrant un compromis entre robustesse et simplicité, puisqu'il nécessite un nombre modéré de paramètres d'entrée, (2) adapté aux conditions de manque d'eau puisqu'il s'agit d'un *water driven model* et (3) qu'il a été testé et validé sur un large panel de conditions agro-environnementales.

AquaCrop a été principalement utilisé pour une application locale, à l'échelle de la parcelle sur un terrain plat. Il a récemment été utilisé en conditions de relief collinaire, soit d'une manière multi-locale, soit d'une manière distribuée prenant en compte les échanges des flux d'eau latéraux par connectivité inter-parcellaire. Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour aborder la diversité des situations induites par les agrosystèmes pluviaux méditerranéens, en conditions de relief collinaire, en relation avec les conditions de culture, de sol et de topographie. De plus, AquaCrop n'a été évalué, de manière simultanée, que sur quelques variables décrivant le fonctionnement des cultures. Une évaluation multicritère est donc importante et nécessaire, pour fournir une appréciation générale des capacités de ce modèle.

L'objectif de cette partie est de réaliser une évaluation multicritère des capacités du modèle de culture AquaCrop à simuler les variables de croissance et de production végétale (taux de

couverture végétale - CC et biomasse aérienne sèche - AGB) ainsi que les principales variables du bilan hydrique (évapotranspiration - ET_a , ruissellement - R et stock hydrique du sol - SWC), et ce pour un ensemble de combinaisons de cultures et de sol, peu abordées dans la littérature, en considérant plusieurs années hydro-climatiques contrastées. Parmi les cultures étudiées, nous nous focalisons sur deux cultures caractéristiques de l'agriculture pluviale méditerranéenne peu étudiées par AquaCrop : la fève et l'avoine

- **Matériels et méthodes**

Le site d'étude choisi pour ce travail est le bassin versant de Kamech, situé au nord-est de la Tunisie sur la péninsule du Cap-Bon. Kamech a été choisi pour sa représentativité des conditions de l'agriculture pluviale méditerranéenne, discutées dans le chapitre 1, ainsi que l'existence d'une base de données riche grâce à la présence de l'observatoire ORE OMERE. La base de données choisie pour la réalisation de ce travail est composée de neuf jeux de données, combinant au total cinq années hydrologiques contrastées, huit parcelles, quatre cultures (deux céréales à grains : blé et orge, un fourrage : avoine et une légumineuse : fève) et trois classes de sol (Luvisols, Cambisols et Vertisols).

Pour son fonctionnement, AquaCrop requiert des données de forçage climatiques (température, pluie, ET_0), des données de sol (profondeur du sol, propriétés hydrodynamiques), des données de culture (stades phénologiques, caractéristiques morphologiques) et des données de pratiques agricoles (taux de fertilisation, date de semis, etc). Le modèle a aussi besoin d'informations concernant le stock hydrique du sol au semis.

Pour les données du forçage climatique, nous avons utilisé des données de température (minimale et maximale) ainsi que des données de pluviométrie collectées, au sein du bassin versant, à pas de temps journalier. Les données de ET_0 sont estimées par la formule de Penman-Monteith à un pas de temps de 30 min, puis agrégées au pas de temps journalier. Les paramètres de végétation utilisés, décrivant le fonctionnement des cultures (stades phénologiques, caractéristiques morphologiques, etc), sont des paramètres issus de la littérature, déjà calibrés pour les variétés locales étudiées. Quant aux propriétés hydrodynamiques, nécessaires pour décrire le sol, nous avons utilisé, selon les parcelles, des paramètres estimés selon la méthode agro-climatique ou par des mesures en laboratoire.

L'initialisation du modèle concerne principalement le stock hydrique à la date de semis (SWC_i) et le taux de fertilisation (FR). En l'absence d'information, SWC_i et FR sont déterminés en minimisant la différence entre les valeurs observées et les valeurs simulées de CC, AGB et SWC.

L'évaluation des sorties du modèle est faite par type de culture pour plusieurs sols, et par classe de sol pour plusieurs cultures. De plus nous utilisons deux types de représentations graphiques, des nuages de points pour caractériser les erreurs systématiques et aléatoires, et des chroniques temporelles pour évaluer les performances du modèle pour analyser les dynamiques du couvert végétal et des flux hydriques, en lien avec le climat et la phénologie des cultures considérées. L'évaluation statistique des résultats est faite en se basant sur plusieurs critères statistiques : coefficient of determination (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), Mean Bias Error (MBE) et Index of agreement (d). Nous avons aussi utilisé le test de Student pour tester l'hypothèse nulle (pente et ordonnée à l'origine des régressions linéaires respectivement égales à 1 et 0).

- **Principaux résultats**

L'évaluation multicritères d'AquaCrop montre que le modèle est capable de simuler correctement plusieurs variables, simultanément. Pour les variables décrivant la croissance et la production végétale, les simulations du modèle sont de qualité moyenne pour CC avec $R^2 = 0,45$ et $RMSE = 0,24$, en moyenne, et acceptable pour AGB, avec $R^2 = 0,81$ et $RMSE = 0,85$ tonne.ha⁻¹, en moyenne. Le modèle simule d'une manière acceptable (1) ETa, avec $R^2 = 0,62$ et $RMSE = 0,77$ mm jour⁻¹ en moyenne, (2) R avec $R^2 = 0,68$ et $RMSE = 0,75$ mm jour⁻¹, en moyenne et (3) SWC avec $R^2 = 0,86$ et $RMSE = 27,4$ mm, en moyenne. Les performances du modèle sont satisfaisantes dans la plupart des cas, avec des p-valeur supérieures à 5% (test de Student).

- **Discussion**

À notre connaissance, ce présent travail est la première étude utilisant AquaCrop pour la culture de la fève et de l'avoine dans un climat semi-aride méditerranéen. D'après les résultats de cette étude, AquaCrop simule correctement le fonctionnement de ces deux cultures en utilisant les paramètres cultureux existant dans la littérature. AquaCrop simule aussi correctement le fonctionnement des combinaisons sol/culture en utilisant les paramètres existant dans la littérature et les mesures de terrains.

Les résultats de cette étude concordent bien avec ceux reportés dans la littérature, sachant que les études précédentes ont principalement été réalisées en terrain plat. Les similitudes reportées concernent particulièrement la surestimation de CC et de la biomasse en fin du cycle, ce qui peut être induit par un retard de la simulation de la sénescence par AquaCrop, pour certaines années. Notre étude montre aussi que les capacités d'AquaCrop à simuler la dynamique végétale et les flux hydriques pour des années hydro-climatiques contrastées ne dépendent pas de la classe du sol, mais dépendent de la culture, et changent d'une variable à une autre. Le ruissellement est mal simulé en début et en fin du cycle cultural, à cause de la présence des fentes de retrait sur des sols ayant de fortes teneurs en argile. Ces fentes constituent un phénomène complexe très difficile à prendre en compte dans les modèles numériques, notamment les modèles simplifiés. Cependant, les simulations de ruissellement sont correctes pour les autres phases du cycle cultural, quand le sol est humide et que les fentes sont refermées.

- **Limites et perspectives**

Bien que la présente étude permette d'appréhender les capacités d'AquaCrop sur plusieurs années dans le cadre d'un observatoire de recherche en environnement, la base de données utilisée contient certaines limites, avec par exemple (1) un seul jeu de données pour la culture d'orge et pour la classe de sol Luvisols, et (2) deux cultures sur une même classe de sol pour l'ETa. Cependant, les résultats obtenus permettent d'envisager l'utilisation d'AquaCrop dans le contexte méditerranéen considéré, en particulier pour étudier l'efficacité agronomique de l'eau en lien avec la connectivités inter-parcellaire induites par le relief collinaire, incluant un focus sur l'eau disponible pour les cultures.

Multicriteria evaluation of the AquaCrop crop model in a hilly rainfed Mediterranean

Dhouib Mariem, Zitouna-Chebba Rim, Prévot Laurent, Molénat Jérôme, Mekki Insaf, Jacob Frédéric.

Highlights

- Multicriteria evaluation of AquaCrop for rainfed hilly agrosystems.
- Various combinations of Mediterranean crops and soils.
- AquaCrop performance strongly depends on crop type and slightly on soil class.
- The results are similar to those reported in previous studies over flat terrains.
- AquaCrop can be used to characterize crop functioning and related water fluxes.

Abstract

Exploring crop spatial organizations within landscapes is a promising solution for agroecological transitions and climate change adaptation in Mediterranean rainfed hilly agrosystems. A prerequisite is to ensure that crop models can simulate a range of agrohydrological processes in such agrosystems. The current study deepened the evaluation of the AquaCrop model by conducting a multicriteria evaluation (canopy cover CC, dry aboveground biomass AGB, actual evapotranspiration ET_a, runoff R, soil water content SWC) for a range of crop and soil combinations, and for contrasted hydroclimatic years in northeastern Tunisia. The data were collected in the Kamech catchment (OMERE Observatory) during nine measurement campaigns on predominant soils and crops. AquaCrop simulations were based on field observations and parameters from the literature. AquaCrop could simulate plant dynamics and water fluxes for contrasted hydroclimatic years, with a slight dependence on soil class and a significant dependence on crop type. Model simulations were of moderate quality for CC (R² of 0.45, RMSE of 0.24 on average) and of acceptable quality for AGB (R² of 0.81, RMSE of 0.85 ton ha⁻¹ on average). AquaCrop acceptably simulated water transfer across the soil–plant continuum (R² of 0.62, RMSE of 0.77 mm day⁻¹ on average for ET_a; R² of 0.68, RMSE of 0.75 mm day⁻¹ on average for R; R² of 0.86, RMSE of 27.4 mm on average for SWC). The model performances

were satisfactory for most cases, with p values larger than 5% for the Student's t test on linear regressions of validation. Our results were similar to those reported in previous studies over flat terrain, including delayed senescence by model simulations with subsequent overestimation of CC and AGB observations. Additionally, soil cracks likely altered the AquaCrop ability to simulate runoff. Despite these limitations, our results support the application of AquaCrop to evaluate water productivity in hilly agrosystems.

Keywords

AquaCrop model; Rainfed agrosystems; Hilly terrains; Multicriteria evaluation; Mediterranean soils and crops; Soil water balance

1. Introduction

Mediterranean agriculture is an important sector from economic, social and environmental perspectives, especially for the southern and eastern Mediterranean countries. It is a significant contributor to gross domestic product (GDP) in these countries; it ensures food security, and it helps reduce rural migration by providing local jobs (Tanyeri-Abur, 2015). Rainfed agriculture covers 80% and 75% of cultivated lands in the world and North Africa, respectively (Bhattacharya, 2019 ; Wani et al., 2009). It is generally based on family systems, and it has significant room for improvement in water productivity (Ruben and Pender, 2004). In hilly areas, the productivity of rainfed agriculture depends not only on the rainfall regime but also on the spatiotemporal distribution of surface water and sediment flows (Norouzi et al., 2010). Until now, Mediterranean public policies within hilly areas have mainly focused on mobilizing blue water resources for irrigated agriculture through the planning of hydroagricultural infrastructures (e.g., dams, reservoirs) and have focused less on optimizing the use of green water for rainfed agriculture (Nouri et al., 2020).

Despite of numerous benefits for Mediterranean hilly areas, rainfed agriculture undergoes several pressures (Brun et al., 2016), either climate-driven (floods and erosion, heat waves, rainfall shortages) or anthropogenic-driven (population growth, increasing agricultural activities and hydroagricultural infrastructures). From a sustainability perspective, it is important to quantitatively manage agricultural water, where some of the numerous solutions to be explored involve the spatiotemporal modulation of anthropogenic actions, individually or in combination (IAASTD, 2008). These solutions imply processes (fluxes, storages and transformations) and several components (e.g., root zone, aquifer, vegetation, hydroagricultural infrastructures, agricultural practices) within agrosystems. The exploration of these solutions must account for

two key points. First, in situ scientific experiments are not suitable for both large agricultural areas and forecasts in a climate change context, which makes necessary the use of process modelling for numerical simulations (Jones et al., 2017). Second, the water cycle and crop dynamics are strongly linked. Vegetation cover drives the rainfall repartition between runoff and infiltration in relation to fluxes within hydrographic networks towards lakes and reservoirs, to soil water storage and to aquifer refill. The water cycle drives root zone water content and crop water consumption, with consequences on agricultural yields. It is therefore important to properly characterize the interactions between the water cycle and crop functioning within agrosystems (Kanda et al., 2018).

Integrated process modelling should be able to simulate, within hilly catchments, crop functioning and the water cycle along with their interactions. This requires parsimonious crop models that (1) minimize the number of parameters for realistic simulations with spatialization purposes and (2) simulate crop functioning in relation to water dynamics within the root zone layer and underlying shallow aquifer. The literature provides a large number of crop models that describe plant functioning and growth along with crop yield (Weiss et al., 2020). Well known examples are APSIM (Keating et al., 2003), DSSAT (Jones et al., 2003), EPIC (Williams et al., 1984), STICS (Brisson et al., 2003), WOFOST (Todorovic et al., 2009, de Wit et al., 2019), AquaCrop (Raes et al., 2009, Steduto et al., 2009), CropSyst (Stöckle et al., 2003), or AqYield (Constantin et al., 2015, Tribouillois et al., 2018). Based on the primary factors that describe crop functioning, Todorovic et al. (2009) classified crop models into (1) carbon-driven models such as WOFOST, CROPGRO, and DSSAT, (2) solar radiation-driven models such as CERES, EPIC, STICS, and APSIM, and (3) water-driven models such as AquaCrop and CropSyst in which biomass production is proportional to the amount of transpired water. CropSyst is a model based on water and solar radiation. When the vapour pressure deficit (VPD) is very low, the transpiration-biomass relationship is replaced by a radiative approach in which biomass is determined on the basis of intercepted photosynthetically active radiation (IPAR, Stöckle et al., 2003; Kanda et al., 2018). Among the aforementioned crop models, AquaCrop is therefore the unique water-driven model (Kanda et al., 2018). It is thus an interesting model for addressing the coupling of crop functioning and the water cycle within Mediterranean hilly catchments typified by rainfed agriculture. In addition, it provides a trade-off between robustness and simplicity, since it requires a moderate number of input parameters.

The literature includes numerous studies that involve AquaCrop. These studies can be classified into four main groups, according to their content: (1) calibration, validation, and performance

evaluation of the model in specific contexts (Mkhabela and Bullock, 2012 ; Zeleke, 2019) ; (2) cropping system management on the basis of model simulations: estimation of crop water requirements, sowing dates and crop yields, as well as consequences of fertilization, salinity, and irrigation regimes on crop yield (Araya et al., 2010; Qin et al., 2013; Nyakudya and Stroosnijder, 2014; El Mokh et al., 2017; Er-Raki et al., 2021) ; (3) impact of climate change on crop production and evaluation of different adaptation strategies (Rashid et al., 2019; Muluneh, 2020; Raoufi and Soufizadeh, 2020) ; and (4) economic impact of cropping practices and climate change on productivity (Cusicanqui et al., 2013 ; Bird et al., 2016). Meanwhile, AquaCrop has been used across the five continents, under different climates (Mediterranean, tropical, continental, temperate) and within both irrigated and rainfed agrosystems (Geerts et al., 2009; García-Vila and Fereres, 2012; García-López et al., 2014; Vanuytrecht et al., 2014; Ahmadi et al., 2015; Deb et al., 2015; Silvestro et al., 2017; Xing et al., 2017; Sandhu and Irmak, 2019; Lu et al., 2021). Overall, AquaCrop has been tested and validated on a wide range of agro environmental conditions.

Some of the aforementioned AquaCrop-based studies focused on variables describing crop growth, such as canopy cover CC, dry aboveground biomass AGB and yield (Todorovic et al., 2009; Mkhabela and Bullock, 2012; Silvestro et al., 2017). Other studies addressed actual evapotranspiration (ETa) (Geerts et al., 2009; Katerji et al., 2013) as well as soil water content (SWC) (Nyakudya and Stroosnijder, 2014; Sghaier et al., 2014). Similar to most crop models, AquaCrop was designed and evaluated for local applications at the plot level over flat terrains. More recently, the model was evaluated on hilly terrains, either in a multilocal way that disregarded interplot water exchanges (Alaya et al., 2019; Han et al., 2019) or in a distributed way that accounted for interplot water exchanges (Van Loo and Verstraeten, 2021). However, more research is needed to address the diversity of situations induced by Mediterranean rainfed hilly agrosystems in relation to cropping, soil and topographic conditions. In addition, AquaCrop was evaluated on only a few variables simultaneously, whereas any multicriteria evaluation is likely to provide a better assessment of model capacities.

The objective of this study is to deepen the evaluation of the capabilities of the AquaCrop model for rainfed crops within hilly Mediterranean catchments. We propose (1) to consider little-studied crops (e.g., faba bean and oats) under subhumid to semiarid climates, (2) to consider combinations of crops (faba bean, oats, wheat, barley) and soils (Vertisols, Cambisols and Luvisols) for contrasted hydroclimatic years, and (3) to conduct a more substantial multicriteria analysis that includes simultaneously vegetation canopy (CC, AGB), soil water content

integrated over topsoil and root zones, and water fluxes (ETa, runoff as infiltration excess). We focus here on the evaluation of AquaCrop without addressing calibration issues. The current paper is structured as follows. We briefly present the AquaCrop model. We introduce the study area and the datasets used, as well as the strategy for evaluating the model. Thereafter, we analyse the comparison of the simulations against the observations by exploring the possible influences of soil and crop type. We finally discuss these results in light of former studies, and we conclude with our contribution to the assessment of AquaCrop performances, along with further perspectives.

2. Presentation of the AquaCrop model

Detailed presentations of AquaCrop (<https://www.fao.org/aquacrop/en/>) are given by Steduto et al., (2009), Raes et al. (2009) and Salman et al. (2021). We detail here the specificities related to the methodological choices on which the current study relies. Developed by FAO, AquaCrop is a parsimonious (reduced number of parameters) crop model that aims to simulate crop biomass and yield by considering water as the main driver of crop functioning (Kanda et al., 2018). Operating at a daily time step, AquaCrop simulates the vertical exchanges between the different components of the soil–plant–atmosphere continuum.

AquaCrop describes the soil as a reservoir split into several horizons (5 maximum). Each horizon is characterized by texture or related hydrodynamic properties: soil moisture at field capacity (HFC), soil moisture at wilting point (HWP), soil moisture at saturation (HSAT), saturated hydraulic conductivity (KSAT) and drainage coefficient (τ).

The model calculates soil evaporation (E_s) and crop transpiration (T_r) separately, which permits the quantification of the amount of water unused by vegetation (Steduto et al., 2009). Another feature of the model is the description of canopy growth by using canopy cover (CC) instead of leaf area index (LAI). The model calculates T_r as a function of CC, and biomass is determined as a function of both T_r and normalized water productivity (WP^*). The yield is finally calculated by multiplying biomass by harvest index (HI). Water productivity (WP^*) accounts for atmospheric concentration [CO_2] and therefore permit to apply AquaCrop in prospective climate contexts related to precipitation, air temperature, evaporative demand and [CO_2].

The soil water content at each time step results from the balance of drainage, infiltration from rainfall/irrigation, soil evaporation and crop transpiration. AquaCrop accounts for four types of stress that affect crop growth: water stress, heat stress, fertilization stress and salinity stress.

Depending on the type of stress, the target parameters of the model change. For example, water stress affects leaf and CC expansion, root zone expansion, transpiration and the harvest index.

The main variables simulated by the model relate to crop productivity (canopy cover, dry aboveground biomass and yield) and water balance (soil water content, runoff, infiltration, drainage, capillary rise, soil evaporation and vegetation transpiration). The model parameters are related to the crop (conservative parameters, fixed for a given species and nonconservative parameters, varying according to the varieties), the soil (horizon number, texture or hydrodynamic parameters), and the groundwater table (depth). The forcing variables of the model are the climatic variables: reference evapotranspiration (ET_0), air temperature, rainfall and mean annual $[CO_2]$. Agricultural practices include sowing date, fertilization and irrigation. Finally, the initial conditions include the initial soil water and salinity content.

3. Materials and methods

3.1. Study site

The study was conducted within the Kamech catchment, which is the southern site of the Mediterranean Observatory of Rural Environment and Water (French acronym OMERE, Molénat et al., 2018) that has collected multiple observations over the last 30 years. Kamech is a small hilly catchment area (2.6 km² size) located within the Cap-Bon Peninsula, northeastern Tunisia (10°52'-10°53'E and 36°52'-36°53' N, 108 m above sea level - asl.). It is representative of the climatic and cropping conditions of the region. The climate is Mediterranean subhumid/semiarid. The rainy season spans from October to March (Mekki, 2003) with a cumulative rainfall of 635 mm (annual average over the [1994-2020] period) and an annual reference evapotranspiration of 1366 mm (Molénat et al., 2018). The area is 70% agricultural, combining crops and livestock, with significant spatiotemporal variability in land cover and spatial heterogeneity in soil types (Mekki, 2003; Mekki et al., 2006).

The Kamech catchment is typified by a diversified land cover that encompasses rainfed and fodder crops (Mekki, 2003; Zitouna-Chebbi et al., 2018). The dominant crops are winter cereals (durum wheat, barley, oats and triticale) and legumes (chickpeas, faba bean and peas). Altitudes range from 80 m to 200 m, and terrain slopes vary between 0 and 30%. The geological substratum is from the Miocene epoch, and it is mainly made of marl and clay (Mekki, 2003; Molénat et al., 2018). The four dominant soils are Cambisols, Luvisols, Vertisols and Regosols. They cover

46%, 26%, 10% and 18% of the catchment area, respectively (Mekki et al., 2018b). The soil depth varies from a few millimetres to 2 m.

Kamech is also typified by a large occurrence of swelling clay soils with shrinkage cracks that occur from March to December (Mekki, 2003; Inoubli, 2016). The closing of cracks heavily depends on rainfall at the beginning of the wet season and completely ends after cumulative rainfalls of approximately $200 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ (Mekki, 2003). At their maximum opening, they have a water storage capacity of approximately 70 mm. Runoff occurs from December to March, when cracks are closed (Mekki, 2003; Inoubli, 2016).

3.2. Datasets

The current study benefits from a large database collected over the last three decades in the framework of the OMERE Observatory. This database includes meteorological, pedological, hydrological and agronomic observations (Mekki et al., 2006, 2018; Zitouna-Chebbi et al., 2018; Inoubli et al., 2017). This permitted to perform a thorough, multicriteria evaluation of the AquaCrop model.

We chose wheat/barley, oats and faba bean as representative species of grain cereals, fodder cereals and legumes, respectively. For each of these crops, some datasets were available between 2001 and 2013. Each of these datasets included a range of observations collected throughout a crop cycle on a given plot from September to August that also corresponded to a hydrological year. We selected the nine most complete datasets for conducting the AquaCrop multicriteria evaluation. This resulted in the combination of five years and eight plots. Table 3.1 shows the available datasets, including the panel of data available in each of the nine datasets for the AquaCrop multicriteria evaluation. Figure 3.1 shows the location of the plots within the Kamech catchment. In the panel of plots presented in Figure 3.1, plot A differs from the others. Indeed, this plot has been dedicated for two decades to regular monitoring as part of the OMERE Observatory. This monitoring included meteorological forcing, surface and subsurface hydrological monitoring, vegetation monitoring and soil characterization.

In the remainder of this section, we present the climatic, pedological, agronomic and hydrological data, by distinguishing between (1) the data used as inputs to the AquaCrop model and (2) the data used for the multicriteria evaluation of the model simulations.

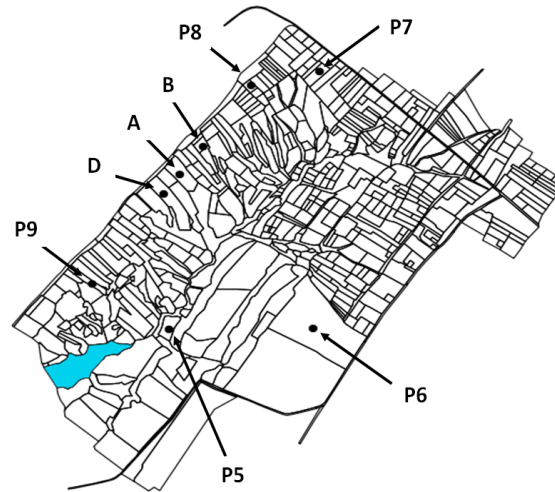


Figure 3.1: Map of the Kamech catchment with the location of the plots A, B, D, P5, P6, P7, P8 and P9. The meteorological station is located near the outlet of the catchment area, downstream limit of the hilly lake.

Table 3.1 : The nine available datasets for the multicriteria evaluation of AquaCrop. LAI_{plan}, CC_{visu}, ET_a, R and SWC stand for LAI from planimetric measurements, canopy cover from visual quantification, actual evapotranspiration, runoff and soil water content, respectively. The value Y of the label Year is related to harvesting year, and thus corresponds the crop cycle that spreads from September of year Y-1 to August of year Y.

Crop	Dataset		Available data					
	Year	Plot	LAI _{plan}	CC _{visu}	ET _a	R	SWC	AGB
Wheat	2001	P7	x			x	x	x
	2002	P9	x			x	x	x
	2013	A	x		x	x	x	x
Barley	2006	D	x				x	
Oats	2002	P6	x			x	x	x
	2005	B	x		x		x	x
Faba	2001	P5		x		x	x	x
	2001	P8		x		x	x	x
	2002	P7		x		x	x	x

3.2.1. AquaCrop input data

3.2.1.1. Climatic data

The climatic data were collected by the meteorological station located near the outlet of the catchment area. First, ET_0 was calculated at the half-hourly time step by using the FAO-56 method along with measurements of solar radiation, air temperature, air humidity and wind speed. Next, estimates calculated at the half-hourly time step were integrated at the daily timescale.

All rainfall data were collected at a daily time step. The rain gauge for each of the plots P5, P6, P7, P8 and P9 was located downstream of the plot. For plots A, B and D, we used the data collected by the rain gauge located downstream of plot A, thanks to their spatial proximity. In the case of missing data, we used average values across all rain gauges within the catchment area.

3.2.1.2. Soil hydrodynamic parameters

AquaCrop inputs include soil depth and soil moisture at wilting point (HWP) and at field capacity (HFC). We consider three soil classes: Vertisols for plots A, B, D and P5, Cambisols for plots P6, P7, and P8 and Luvisols for plot P9. Soil depth and hydrodynamic parameters for each plot are shown in Table 3.2.

Table 3.2 : Soil characteristics of the plots. Soil classes are taken from Mekki et al. (2006). We used the same values of soil depth for plots A, B and D thanks to their spatial proximity.

Plot	Class	Soil depth	Soil hydrodynamic parameters (m^3/m^3)	
			HWP	HFC
P5	Vertisol	1.60	0.23	0.45
P6	Cambisol	1.50	0.21	0.35
P7	Cambisol	1.60	0.23	0.44
P8	Cambisol	1.20	0.19	0.46
P9	Luvisol	1.60	0.25	0.47
A	Vertisol	1.15	0.34	0.43
B	Vertisol	1.15	0.26	0.44
D	Vertisol	1.15	0.23	0.44

Different approaches are proposed in the literature to determine soil moisture at wilting point (HWP) and at field capacity (HFC), including (1) pedotransfer functions (e.g., Saxton and Rawls, 2006) based on the texture of different soil horizons, (2) direct laboratory measurements from soil samples (Cassel and Nielsen, 1986) and (3) the agroclimatic method which determines HFC and HWP from soil moisture time series throughout the crop growth cycle (Sreelash et al., 2017).

According to expert knowledge about the soil conditions within our study site (Revaillot et al., 2021), the pedotransfer functions are not suitable for the Kamech soils, since the latter are typified by large instability due to poor silt structure. Therefore, we determine HWP and HFC using the laboratory method and the agroclimatic method, and we compared the resulting estimates in order to choose the most reliable ones.

For all plots, we had laboratory measurements of HFC and HWP carried out either on the plots or on neighbouring plots, along with soil moisture data. For the agroclimatic method proposed by Sreelash et al. (2017), HFC corresponds to the maximum soil moisture value without considering measurements after rainfalls or irrigation events, and HWP corresponds to the 5th percentile of the minimum soil moisture measured throughout the crop growth cycle. To determine HFC and HWP by the agroclimatic method, we used all soil moisture data available for each of the eight plots, beyond the datasets used for AquaCrop evaluation. This led to include additional soil moisture data from 2002 on plot P5 and P8, from 2001 and plot P6 and P9, and from 2006 on plot A. All the soil moisture measurements we considered were collected using the same protocol described in the Section 3.2.2.3 of the article. For HFC, we assumed that a rainfall accumulation lower than 10 mm does not have a large influence, and we therefore excluded all measurements for which a rainfall accumulation larger than 10 mm was recorded in the previous 48 hours. For HWP, we take the 5th percentile of the minimum value measured throughout the crop growth cycle.

Table 3 presents, for each plot, HWP and HFC estimates by laboratory measurements (Lab), and by the agroclimatic method (AC), as well as the relative difference Δ calculated as:

$$\Delta = \frac{AC - Lab}{Lab} \quad (3.1)$$

where AC (respectively Lab) represents the HWP or HFC estimates by the agroclimatic method (respectively the laboratory method).

Table 3.3 shows that HWP estimates from the agroclimatic method underestimated those from the laboratory method, with values of relative difference Δ between -26% and -18%, apart from

plot D (32%). For HFC, the differences between the two methods were small, with values of relative difference Δ between -3% and 10%, apart from plot P8 (24%). In this case, HFC estimates from the agroclimatic method overestimated those from the laboratory method, apart from plot P6.

Table 3.3 : Comparison between soil moisture at wilting point (HWP) and soil moisture at field capacity (HFC) estimates by the laboratory measurements (Lab) and the agroclimatic method (AC) methods.

	HWP			HFC		
	AC (m ³ /m ³)	lab (m ³ /m ³)	Δ (%)	AC (m ³ /m ³)	lab (m ³ /m ³)	Δ (%)
P5	0.23	0.31	-26	0.45	0.41	10
P6	0.21	0.27	-22	0.35	0.36	-3
P7	0.23	0.31	-26	0.44	0.41	7
P8	0.19	0.24	-21	0.46	0.37	24
P9	0.25	0.33	-24	0.47	0.45	4
A	0.28	0.34	-18	0.44	0.43	2
B	0.26	0.34	-24	0.44	0.43	2
D	0.23	0.34	-32	0.44	0.43	2

Figure 3.2 displays the times series of soil moisture measurements, as well as the HFC and HWP estimates from (1) the laboratory measurements (HWP-lab and HFC-lab), and (2) the agroclimatic method (HWP-AC and HFC-AC) for each of all plots. Figure 3.2 shows that, apart from plot A, the soil moisture measurements before the harvest dates reach lower levels than the HWP estimates from the laboratory measurements.

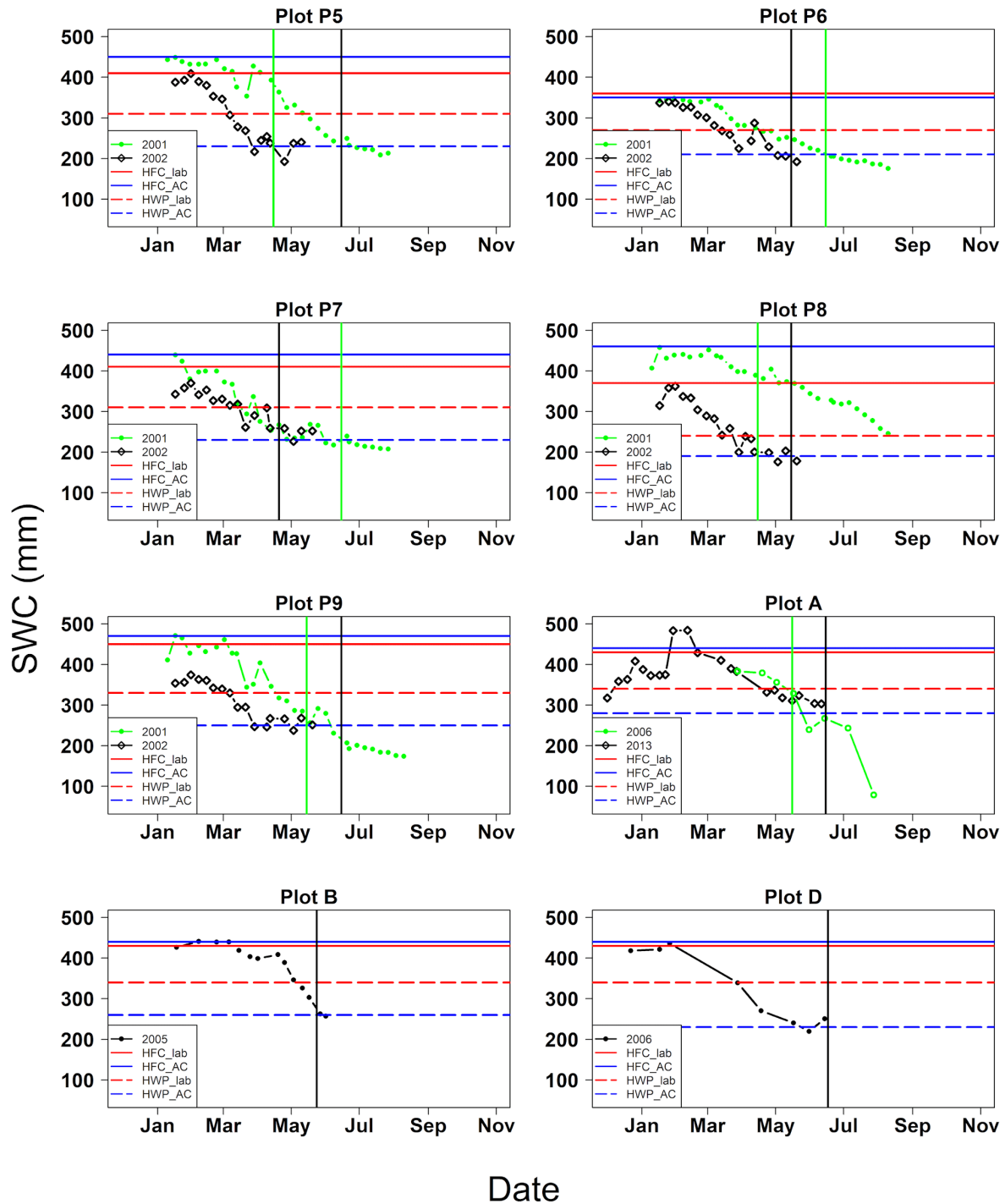


Figure 3.2 : Time series of soil moisture data (dotted lines) for each of the eight plots. The horizontal lines indicate the soil moisture at wilting point (HWP) and soil moisture at field capacity (HFC) estimates from the laboratory measurements (Lab) (red lines) and agroclimatic method (AC) (blue lines) methods. The vertical lines indicate the harvest dates.

As a result, we selected the estimates from the agroclimatic method for all plots apart from plot A. For plot A, the differences between estimates from both methods were very low (10% relative,

comparable to measurement errors), and we selected the estimates from laboratory measurements that were collected in the framework of the OMERE observatory.

3.2.1.3. Crop parameters

We chose wheat/barley, oats and faba bean as representative species of grain cereals, fodder cereals and legumes, respectively. In the literature, there are some annual crops for which AquaCrop parameterizations are not representative of various agro-environmental conditions. Indeed, some parameterizations are proposed in the literature for chickpeas (Mubvuma et al., 2021), leafy vegetables (Nyathi et al., 2018), table grape (Er-Raki et al., 2021), oats and faba bean (Yuan et al., 2013; Zeleke, 2019), but they need to be tested and confirmed in other geo-climatic contexts and for other crop varieties to ensure that they are reliable, as is the case for those related to wheat or corn crops.

For wheat, barley and faba bean, we used parameters proposed in the literature that were rather suitable for the local varieties of our study site, as indicated in Table 2 of Alaya et al. (2019). For oats, we used the values proposed by Yuan et al. (2013) for the conservative parameters (invariant from one variety to another), and we used values related to wheat for the non-conservative parameters that describe the phenological stages throughout the crop cycle, due to the lack of data.

3.2.2. AquaCrop multicriteria assessment

3.2.2.1. Actual evapotranspiration (ET_a)

For actual evapotranspiration, two datasets were available (Table 3.1): the first dataset was collected in plot A in 2013 for wheat, and the second dataset was collected in plot B in 2005 for oats. The time series were collected at the plot scale, with a 30 min timescale throughout the crop cycle. The daily ET_a measurements were derived from the energy balance closure method in 2005 (Zitouna-Chebbi et al., 2015) and from the eddy covariance method in 2013 (Boudhina et al., 2017a). For 2013, the missing latent heat flux data were reconstructed using the REddyProc gap-filling method (Reichstein et al., 2005). The experimentation, calibration, data processing and gap-filling are discussed in detail by Zitouna-Chebbi (2009); Zitouna-Chebbi et al., (2012; 2015; 2018), and Boudhina et al. (2017a, 2017b, 2018). ET_a data were finally aggregated at the daily timescale.

3.2.2.2. Crop variables (CC, AGB)

When dealing with vegetation growth throughout the crop cycle, we used planimetric measurements of the leaf area index (LAI) for cereals (wheat, barley, oats) and visual estimates of canopy cover (CC) for faba bean (Table 3.1). Nevertheless, AquaCrop simulates CC to describe crop growth. For cereals, we therefore converted LAI measurements into CC estimates by using Equation 3.2, as done in numerous studies (Katerji et al., 2013; Yuan et al., 2013; Pereira et al., 2015):

$$CC = 1 - e^{-k \times LAI} \quad (3.2)$$

The coefficient k is an extinction coefficient related to the interception of light by crop canopy cover (Jeuffroy and Ney, 1997; Pereira et al., 2015). It varies according to crop and variety. Different values of k have been proposed in literature for a given crop. For example, the proposed values for barley are $k = 0.5$ (Pereira et al., 2015), $k = 0.48$ (Belhouchette et al., 2008) and $k = 0.65$ (Abrha et al., 2012). For wheat, Jin et al. (2014) proposed a k value of 0.65.

To determine a k value that was suitable to our conditions, we used hemispherical photos that permitted to simultaneously estimate LAI and CC. These photos were collected between 2018 and 2020 thanks to a camera equipped with a fisheye objective. Within each plot, between 10 and 15 photos were collected in a random manner. Table 3.4 summarises the number of plots and measurements available per crop.

Table 3.4 : Number of plots and hemispherical photos available for each crop, to be used for determining the value of coefficient k in Equation 3.2.

Crop	Years	Plot number	Measurements number
Wheat	2018 - 2019 - 2020	8	42
Barley	2019 - 2020	2	10
Oats	2020	1	4

The hemispherical photos were treated with the CAN-EYE software (Weiss et al., 2008) to derive first gap fraction, and then LAI and CC. CAN-EYE permitted to distinguish two types of LAI, namely (1) effective LAI that accounts for leaf aggregation, and (2) true LAI that corresponds to actual leaf surface. The different LAI estimates proposed by CAN-EYE are discussed in Weiss et al. (2008).

- On the one hand, planimetry is a direct and destructive technique for determining leaf area index of any crop canopy. It permits the calculation of actual LAI from direct area measurements.
- On the other hand, hemispherical photography is an indirect, non-destructive technique that permits a significant spatiotemporal sampling of crop canopy within field and throughout the crop growth cycle. It includes other plant green elements such as stems, which corresponds to Plant Area Index (PAI) rather than LAI.
- The goal here was to convert planimetric measurements of LAI into CC estimates by using Equation 3.2. When estimating LAI from hemispherical photos, it was necessary to select the CAN-EYE method that provided LAI estimates as close as possible to the planimetric method. According to Weiss et al (2008), the true LAI calculated by CAN-EYE is the closest to the planimetric LAI, although the relationship between true LAI measured by CAN-EYE and planimetric LAI depends on crop and phenological stage (Demarez et al., 2008; Fang et al., 2018). Therefore, we choose true LAI for equation 3.2.

For the present study, we decided to set a single k value for cereals (wheat, barley and oats), equal to 0.57 ($R^2 = 0.95$; $RMSE = 0.05$). Indeed, the coefficient of variation between the different k values across cereal crops was about 15%, thus comparable to the measurement error (Weiss et al., 2008). Moreover, the three cereal crops we considered were straw cereals with similar leaf geometry that induces similar radiative transfer processes within the canopy.

We also used measurements of dry aboveground biomass (AGB), except for barley in plot D in 2006. For each of the eight datasets, AGB was determined throughout the crop cycle using a destructive method (i.e., field samples to be weighed before and after oven drying). Spatial sampling varied across datasets, ranging from three to 10 replicates (Mekki, 2003; Boudhina et al., 2019). For each crop, the number of observation dates also varied across datasets, between three and 11 dates at maximum.

3.2.2.3. Soil water content (SWC)

Time series of SWC measurements were available for all datasets (Table 3.1). For 2001, 2002 and 2013, measurements were made using a neutron probe with a weekly frequency. For 2005 and 2006, measurements were made by the gravimetric method, with a biweekly frequency throughout the crop cycle and with a bimonthly frequency during summer with bare soil. All measurements were carried out across 1 m depth profiles. To account for spatial variability in SWC, the samples were collected at different landscape positions (distributed across the top,

middle and bottom of each plot), except for 2001 and 2002, with one measurement only per plot. The moisture values were obtained by plot-scale averaging of measurements. Detailed descriptions of the measurements are given in Mekki (2003); Zitouna-Chebbi (2009); Boudhina et al. (2019).

3.2.2.4. Runoff (R)

Runoff measurements were included in each of the datasets listed in Table 3.1, apart from oats in 2005 and barley in 2006. Runoff data were collected at the daily timescale.

- For 2001 (end of December) and 2002 (November), runoff was measured in each plot using a 2 m² size harvesting frame that was connected to a tank with a 20-litre capacity (Mekki et al., 2006).
- For 2013, runoff was measured by the hydrological station located at the outlet of plot A. The experimental protocol is detailed in Inoubli et al. (2017).

3.3. Determination of initial soil moisture and fertilization degree

To obtain reliable AquaCrop simulations throughout the crop cycle for each of the nine datasets (Table 3.1), it was necessary to set the initial soil water content (SWC_i). It was also necessary to set the fertilization rate (FR) for cereal crops, while no fertilization rate was required for faba bean that is a nitrogen-fixing legume crop (FR represents the effect of the soil nutrient level on canopy development and biomass production, and AquaCrop expresses the lack of soil nutrient from soil fertility stress, by means of stress coefficients). Given that no information was available for either SWC_i or FR, we determined them by minimizing the differences between observations and simulations of CC, AGB and SWC (time series of ET_a were available for only two datasets).

For each of the nine datasets, we choose 15 SWC_i values between HWP and HFC and 30 FR values ranging from 70 to 100% according to expert knowledge. We then created pairs (SWC_i, FR) and generated the corresponding AquaCrop simulations. The optimal (SWC_i, FR) pair was selected using two criteria. First, the NRMSE (normalized root mean square error) had to be lower than 15% for SWC, which corresponds to measurement error on soil moisture (Susha Lekshmi et al., 2014). Second, we minimized the quadratic error between the observations and simulations of CC and AGB simultaneously using the objective function F defined by Equation 3.3 (Montes et al., 2014):

$$F = NRMSE_{CC}^{1/2} + NARMSE_{AGB}^{1/2} \quad (3.3)$$

AquaCrop tends to overestimate CC observations during the senescence phase in the case of heat waves (Andarzian et al., 2011), while early senescence is recurrent in Kamech. To avoid the influence of any overestimation when minimizing the quadratic error, we calculated F over a simulation period that spread from the beginning of the crop growth to the maximum plant cover ($CC = CC_{max}$). Across the selected AquaCrop simulations, the obtained SWC_i values were larger than $0.75 \times HFC$, and those retained for FR were approximately 85%. According to expert opinions, the FR values are representative of actual field conditions in the Kamech watershed.

3.4. Model evaluation

AquaCrop was evaluated by comparing simulations against observations throughout the crop cycle related to each of the nine datasets by considering the variables listed in Table 1 and related to vegetation (AGB, CC), water fluxes (ET_a , runoff as infiltration excess), and water storage (SWC). Table 3.1 details the available data used for each crop, year and plot.

For the statistical evaluation of the simulations against observations, we selected the following indicators: coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE) and mean bias error (MBE). These are commonly used in the literature for evaluating numerical models (Kustas et al., 1996; Jacob et al., 2002), including hydrological (Moriassi et al., 2015) or crop (Yang et al., 2014) models. We also used the Student's t test for linear regressions on model validation, to test the null hypothesis (slope and offset can be equal to 1 and 0, respectively). If the critical values (p value) were larger than 5%, then the null hypothesis could not be rejected with 95% confidence, and model performances could be considered satisfactory.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3.5)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (3.6)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (3.7)$$

where P_i and O_i , are the simulated and observed variables at time step i , respectively. \bar{O} is the averaged value of the observations, and n is the observation number.

MBE indicates whether the model simulations underestimate or overestimate the observations. NRMSE gives an indication of the relative difference between simulations and observations. According to Jamieson et al. (1991), a crop model is classified as excellent if $\text{NRMSE} < 10\%$, good if $\text{NRMSE} \in [10\% - 20\%[$, acceptable if $\text{NRMSE} \in [20\% - 30\%[$ and poor if $\text{NRMSE} > 30\%$. Likewise, simulations are considered acceptable if the coefficient of determination R^2 is greater than 0.5. For runoff, we did not consider the NRMSE in the evaluation of the AquaCrop simulations because of the low values of this variable, which give very high NRMSE values ($> 100\%$) that are difficult to interpret.

4. Results

4.1. Canopy cover (CC)

According to the comparison between AquaCrop simulations and in situ measurements of CC (Figure 3.3 and Table 3.5), for each crop type, AquaCrop simulations overestimated observations for cereals and underestimated them for faba bean, with a positive MBE ranging between 0.03 and 0.23 for cereals and a negative MBE (-0.02) for faba bean. The R^2 values did not exceed 0.4, apart from faba bean (0.9). The RMSE values varied between 0.11 (29% relative) and 0.37 (75% relative), with the lowest values being observed for faba bean. For wheat and faba bean, the t test provided p values larger than 5% on slope and offset. For barley, the t test provided p value lower than 5% on slope and offset. For oats, the t test provided a p value lower than 5% on offset only.

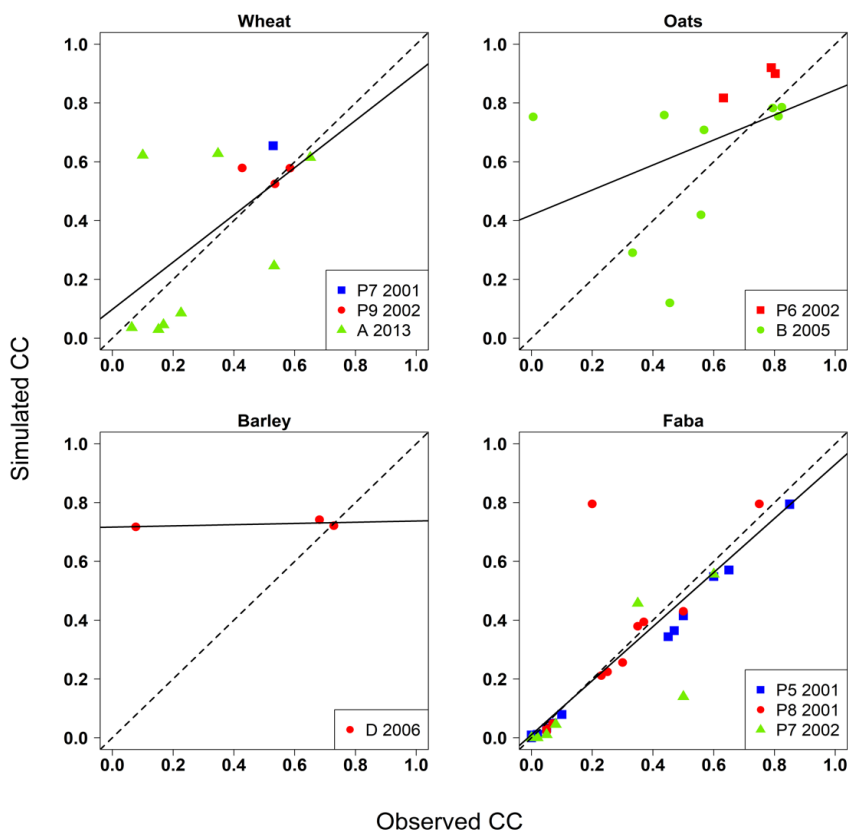


Figure 3.3 : Comparison between simulated and observed canopy cover (CC) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Table 3.5 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for canopy cover (CC) on a crop type basis. n is the observation number. R² is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Crop	Var	n	R ²	Offset	Slope		RMSE	NRMSE	MBE	
			(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(-)		
			Value	t test	Value	t test				
Wheat	CC	12	0.39	0.10	0.47	0.80	0.55	0.21	58	0.03
Oats		12	0.18	0.42	0.04	0.43	0.08	0.27	46	0.08
Barley		3	0.33	0.72	0.02	0.02	0.02	0.37	75	0.23
Faba		38	0.86	0.01	0.73	0.92	0.21	0.12	32	-0.02

To study these results in detail, we analysed the temporal evolution of CC for each simulation throughout the corresponding crop cycle (Figure A.1 - annex A). For wheat in 2002, oats in 2005, and barley in 2006, the temporal evolution of the canopy cover simulated by the model showed acceptable estimates during the crop growth phase, despite an overestimation of CC observations during the senescence phase. For wheat in 2013, AquaCrop underestimated observations between DAS (day after sowing) 25 and DAS 120, and it overestimated them at the end of the crop cycle. For oats in 2002, the model underestimated observations throughout the crop cycle. Most time series suggested that AquaCrop simulated senescence with delay compared to observations.

For each soil class, the comparison between AquaCrop simulations and in situ measurements of CC (Figure 3.4 and Table 3.6) showed that AquaCrop simulations overestimated observations for the three soil classes. Additionally, the agreement between the model simulations and in situ measurements was moderate, with either (1) large R^2 values (0.59 and 0.8) but large RMSE values (0.15 and 0.21, corresponding to 41% and 48% relative, respectively) or (2) a moderate RMSE value (0.09, 18% relative) but a low R^2 value (0.05). Nevertheless, it was difficult to conclude for Luvisols because of the dataset size, with only one plot and one year. Conversely, the results for both Vertisols and Cambisols were similar, with relative changes in statistical indicators of approximately 25%. Apart from t test on slope for Vertisols, all p values were larger than 5%.

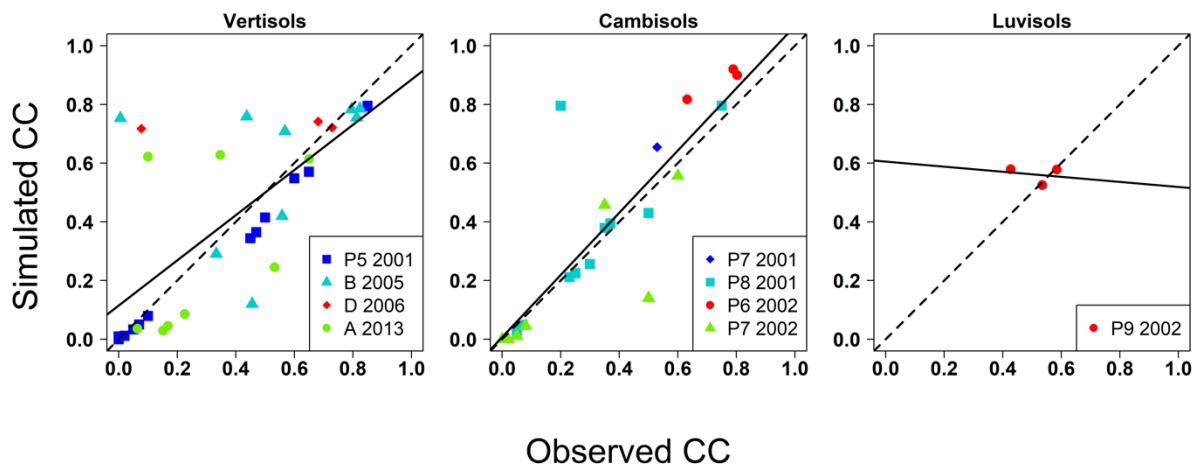


Figure 3.4 : Comparison between simulated and observed canopy cover (CC) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Finally, we could not conclude on any possible trend to over- or under- estimation according to the magnitude of observations. Indeed, the regression slope could be larger or lower than one from one soil class to another, in contrast to results reported on a crop type basis for which the regression slope was systematically lower than one.

Table 3.6 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for canopy cover (CC) on a soil class basis. n is the observation number. R^2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Soil	Var	n	R^2 (-)	Offset		Slope		RMSE (-)	NRMSE (%)	MBE (-)
				(-)	t test	(-)	t test			
Vertisols	CC	39	0.59	0.12	0.05	0.77	0.03	0.21	47	0.01
Cambisols		23	0.76	0.01	0.90	1.06	0.64	0.16	45	0.03
Luvisols		3	0.05	0.61	0.20	-0.09	0.21	0.09	17	0.05

4.2. Aboveground biomass (AGB)

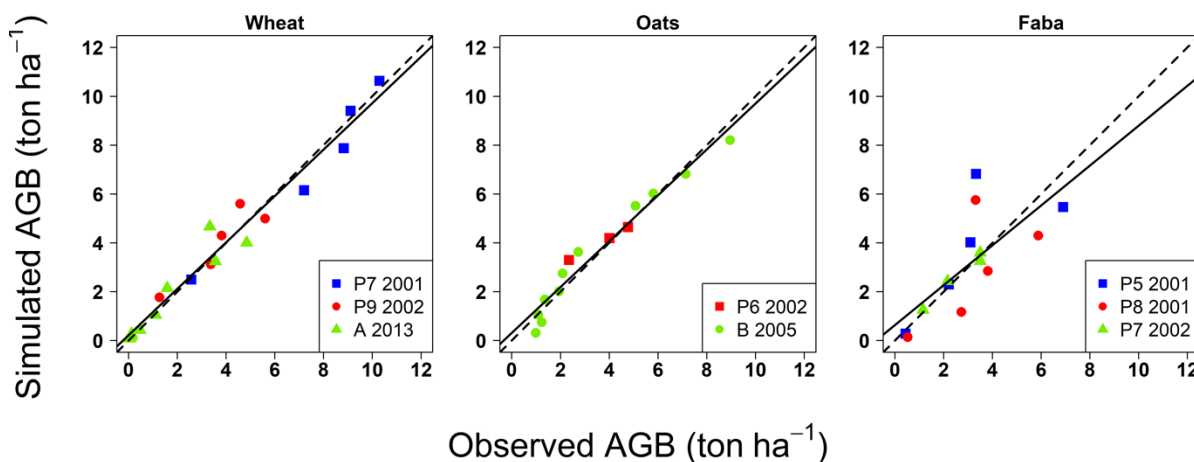


Figure 3.5 : Comparison between simulated and observed aboveground biomass (AGB) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line

The comparison between simulated and observed AGB (Figure 3.5 and Table 3.7), for each crop type, showed a good estimation of this variable by the model for cereals, with R^2 approximately 0.95 and RMSE approximately 0.6 ton ha⁻¹ (16% relative). For faba bean, the simulations were less good, with $R^2 = 0.52$ and RMSE = 1.4 ton ha⁻¹ (46% relative). The bias values indicated that

AquaCrop tended to overestimate AGB observations for cereals ($MBE > 0$) and to underestimate them for faba bean ($MBE < 0$). For all crop types, the t test provided p values larger than 5%.

Table 3.7: Statistical indicators when comparing simulations against observations for aboveground biomass (AGB) on a crop type basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Crop	Var	n	R ² (-)	Offset (ton ha ⁻¹)		Slope (-)		RMSE (ton ha ⁻¹)	NRMSE (%)	MBE (ton ha ⁻¹)
				Value	t test	Value	t test			
				Wheat	AGB	19	0.96			
Oats		14	0.95	0.31	0.25	0.94	0.33	0.53	15	0.10
Faba		14	0.52	0.64	0.44	0.82	0.43	1.40	46	0.08

To better understand the poor results for faba bean, Figure A.2 - annex A displays the temporal evolution of AGB for both cereal crops and faba bean during the crop cycle. We noted that AquaCrop appropriately simulated AGB for 2002 in plot P7. For the year 2001 in plots P5 and P8, the model acceptably simulated AGB at the beginning of the crop cycle until Day 125 after sowing, but it overestimated observations at the end of the crop cycle. This could explain the low R² value given in Table 3.5.

The comparison between AquaCrop simulations and in situ measurements of AGB (Figure 3.6 and Table 3.8) for each soil class, showed that AquaCrop simulated AGB well for the 3 soil classes. Bias values indicated that the model tended to overestimate observations for Vertisols and Luvisols ($MBE > 0$) and to underestimate them for Cambisols ($MBE < 0$). The R² values were above 0.84, with a small relative variation of 6% across the 3 soil classes. The RMSE values were between 0.62 ton ha⁻¹ (17% relative) and 0.95 ton ha⁻¹ (21% relative). Additionally, all regression slopes were close to one, as was the case when analysing results on a crop type basis. This outcome agreed with the results of the t test that provided p values larger than 5% for all soil classes.

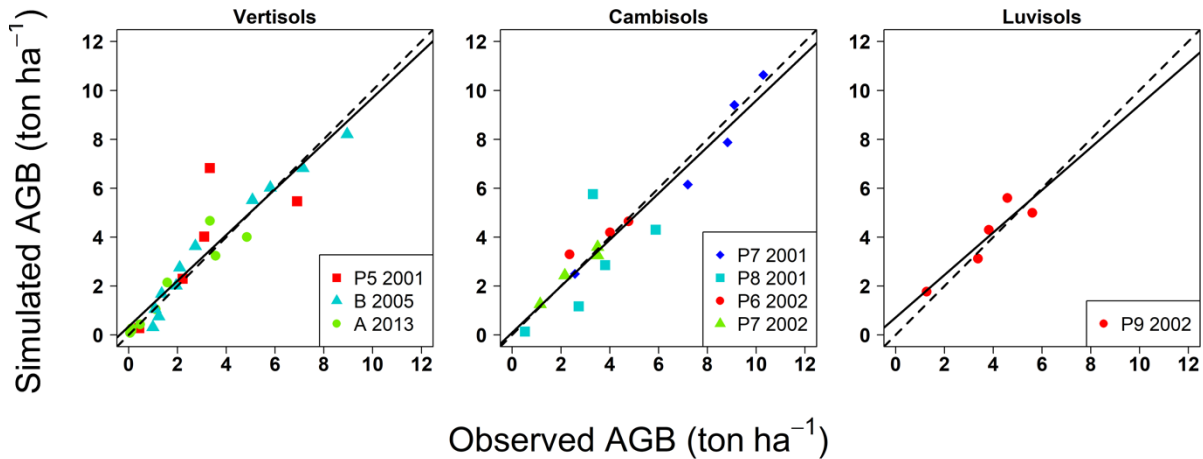


Figure 3.6 : Comparison between simulated and observed aboveground biomass (AGB) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Table 3.8 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for aboveground biomass (AGB) on a soil class basis. *n* is the observation number. *R*² is the correlation coefficient. The *t* test corresponds to the *p* value of the Student's *t* test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Soil	Var	n	R ² (-)	Offset		Slope		RMSE (ton ha ⁻¹)	NRMSE (%)	MBE (ton ha ⁻¹)
				(ton ha ⁻¹)		(-)				
				Value	t test	Value	t test			
Vertisols	AGB	25	0.86	0.35	0.24	0.94	0.42	0.92	33	0.17
Cambisols		17	0.89	0.10	0.83	0.95	0.56	0.95	21	-0.13
Luvisols		5	0.84	0.72	0.47	0.87	0.59	0.62	17	0.23

4.3. Actual evapotranspiration (ET_a)

As shown in Table 3.1, ET_a measurements were only available for oats in 2005 (plot B) and for wheat in 2013 (plot A). The comparison between AquaCrop simulations and in situ measurements of ET_a (Figure 3.7 and Table 3.9) showed a slight overestimation of the observations. The overestimation was more important for oats (MBE = 0.28 mm day⁻¹) than for wheat (MBE = 0.17 mm day⁻¹). The other indicators showed that the model performance was acceptable for both crops, with R² ≥ 0.6 and RMSE ≤ 0.84 mm day⁻¹ (35% relative on average). Additionally, we noted scatterings around the regression lines that were close to the 1:1 line. Apart from slope for wheat, the *t* test provided *p* values lower than 5%.

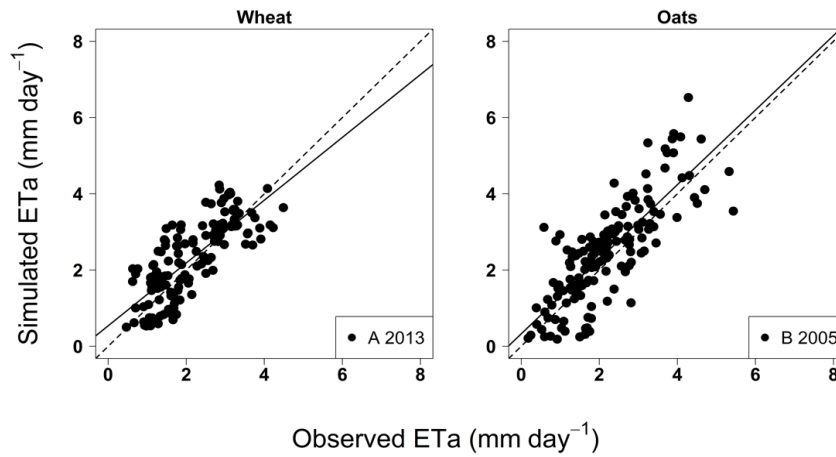


Figure 3.7 : Comparison between simulated and observed actual evapotranspiration (ET_a) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type. A, B relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Table 3.9 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for actual evapotranspiration (ET_a) on a crop type basis. n is the observation number. R^2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Crop	Var	n	R^2	Offset		Slope		RMSE (mm day ⁻¹)	NRMSE (%)	MBE (mm day ⁻¹)
				(-)	(mm day ⁻¹)	(-)	(-)			
				Value	t test	Value	t test			
Wheat	ET_a	134	0.59	0.54	0	0.82	0	0.69	33	0.17
Oats		150	0.64	0.33	0.03	0.98	0.72	0.84	38	0.28

For a better understanding of the scattering around the regression line, we investigated the temporal dynamics of ET_a simulations by AquaCrop throughout the crop cycle for wheat and oats (Figure A.3 - annex A). We observed a significant similarity between the simulated and observed temporal evolutions of ET_a for both crops. For wheat, the overestimation of ET_a observations by model simulations was more important from DAS 130 (9 Mar 2013). For oats, we observed an overestimation of ET_a observations by the model between DAS 140 – (3 May 2005) and DAS 160 - (23 May 2005) – as well as an underestimation of the observations from DAS 160 until the end of the crop cycle. Overall, we did not observe any trend to under- or overestimation according to crop phenological stages.

The two datasets of ET_a belonged to the Vertisols class. The statistical indicators we obtained when merging the scatterplots in Figure 3.7 suggested good model performance in simulating ET_a , with acceptable values for the correlation coefficient (0.62) and RMSE (0.77 mm day^{-1}) and a slight overestimation of ET_a observations by model simulations ($MBE = 0.23 \text{ mm day}^{-1}$).

4.4. Runoff (R)

For runoff (infiltration excess), in situ measurements were available for all datasets, except for barley in plot D in 2006 and oats in plot B in 2005 (Table 3.1). The comparison between AquaCrop simulations and in situ measurements (Figure 3.8 and Table 3.10) for each crop type showed that the model overestimated observations. The magnitude of the overestimation varied from one crop to another, and it was larger for oats ($MBE = 0.2 \text{ mm day}^{-1}$). AquaCrop acceptably simulated runoff for wheat and faba bean, with R^2 values larger than 0.8 and RMSE values lower than 0.63 mm day^{-1} . The simulations were less effective for oats ($R^2 = 0.41$; $RMSE = 1.44 \text{ mm day}^{-1}$). According to Figure 3.8, the overestimation of runoff observations by AquaCrop simulations mainly occurred for low runoff values. For wheat in 2013 in plot A, the model acceptably simulated a significant runoff event (27 mm day^{-1}) with a slight underestimation. For all crops, the t test on slope provided p values equal to 0. Apart from wheat, the t test on offset provided p values larger than 5%.

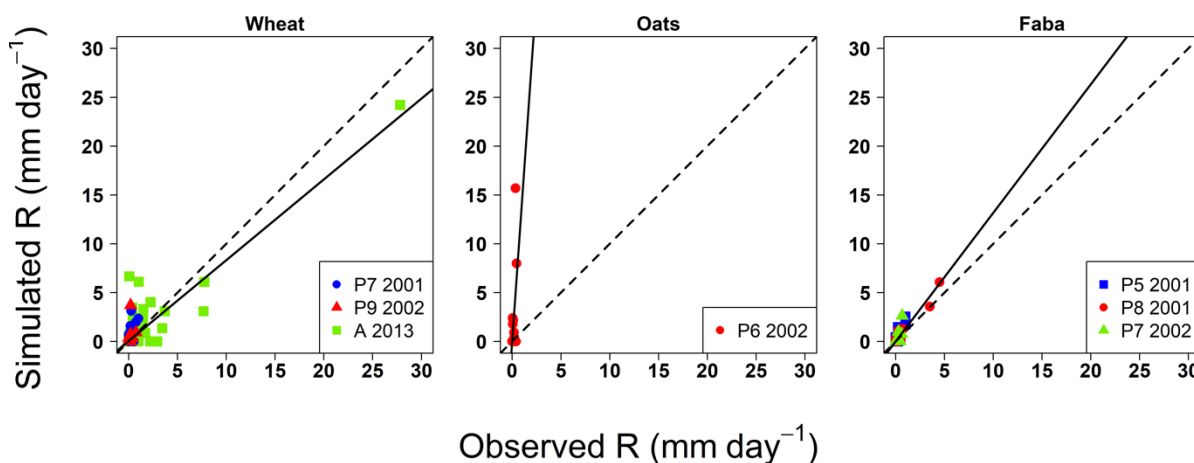


Figure 3.8 : Comparison between simulated and observed runoff (R) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Table 3.10 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for runoff (R) on a crop type basis. n is the observation number. R2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p value of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Crop	Var	n	R ² (-)	Offset		Slope		RMSE (mm day ⁻¹)	MBE (mm day ⁻¹)
				Value	t test	Value	t test		
				(mm day ⁻¹)	(-)	(mm day ⁻¹)	(-)		
Wheat	R	478	0.80	0.06	0.03	0.83	0	0.63	0.02
Oats		147	0.41	-0.03	0.76	14.26	0	1.44	0.20
Faba		453	0.84	0.01	0.25	1.32	0	0.19	0.02

For a better understanding of these scatterplots, Figure A.4 - annex A displays the temporal evolution of observed and simulated runoff for each dataset. Apart from wheat in plot A in 2013, the observed runoff was usually low, with values below 15 mm day⁻¹. The most important differences between observed and simulated accumulations were noted for wheat in plot P7 in 2001 (12 mm day⁻¹) and for oats in plot P6 in 2002 (29 mm day⁻¹). We also noted that the model simulated large runoff values at the beginning of the crop cycle compared to in situ measurements. This was true for wheat in plot P9 in 2002 and in plot A in 2013, as well as for oats in plot P6 and faba bean in plot P7 in 2002. The same trend was also observed at the end of the crop cycle (the last 40 days) for oats in plot P6 in 2002 and wheat in plot A in 2013.

From the comparison between AquaCrop simulations and in situ measurements of runoff, for each soil class (Figure 3.9 and Table 3.11) we noted a better performance of the model for Vertisols (R² = 0.82, RMSE = 0.71 mm day⁻¹), where the large R² value for Vertisols likely results from a single large runoff event. The model performed worse for Cambisols (R² = 0.22 and RMSE = 0.76 mm day⁻¹) and Luvisols (R² = 0.21 and RMSE = 0.28 mm day⁻¹). The t test provided p values larger than 5% and lower than 5% for offset and slope, respectively.

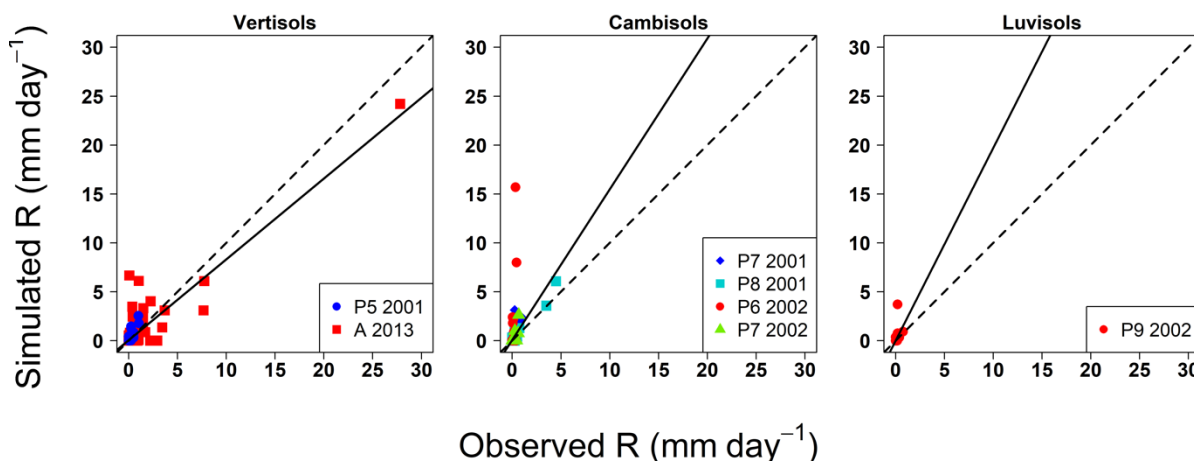


Figure 3.9 : Comparison between simulated and observed runoff (R) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Table 3.11 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for runoff (R) on a soil class basis. n is the observation number. R^2 is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p values of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Soil	Var	n	R^2 (-)	Offset (mm day^{-1})		Slope (-)		RMSE (mm day^{-1})	MBE (mm day^{-1})
				Value	t test	Value	t test		
Vertisols	R	331	0.82	0.05	0.15	0.83	0	0.71	0.01
Cambisols		587	0.22	0.06	0.07	1.54	0	0.76	0.08
Luvisols		160	0.21	0.01	0.61	1.97	0	0.28	0.03

4.5. Soil water content (SWC)

From the comparison between AquaCrop simulations and in situ measurements of soil water content (SWC) (Figure 3.10 and Table 3.12), for each crop type, we noted that AquaCrop simulated this variable very well, with R^2 values between 0.76 and 0.95 and RMSE values between 18.5 mm and 32 mm. The best simulations were observed with oats. The MBE values indicated that the model simulations slightly underestimated the SWC observations for oats and faba beans and slightly overestimated them for wheat and barley. Despite these favourable results, we noted that the regression slope could be far from the 1:1 line for wheat. Additionally, we could not conclude on any possible trend to over- or underestimation according to the

magnitude of in situ measurements. Indeed, the regression slopes were lower than one, apart from oats (1.04). For oats and barley, the t test provided p values larger than 5%. For wheat, the t test provided p value lower than 5%. For faba bean, the t test provided a p value lower than 5% for slope.

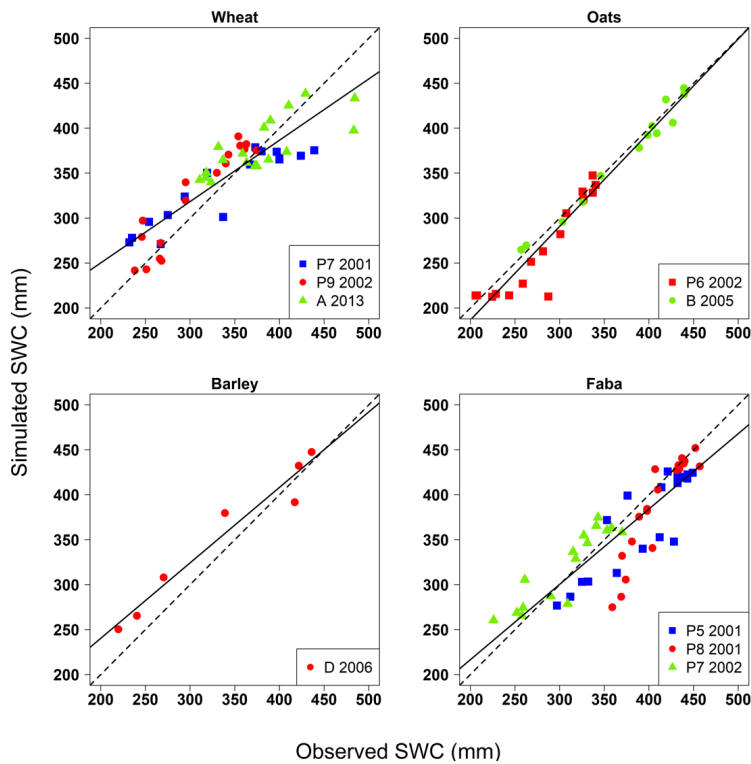


Figure 3.10 : Comparison between simulated and observed soil water content (SWC) on a crop type basis. Each scatterplot corresponds to a crop type for several years and/or several plots. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. Px, A, B, D relates to plots and YYYY to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Table 3.12 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for soil water content (SWC) on a crop type basis. *n* is the observation number. *R*² is the correlation coefficient. The *t* test corresponds to the *p* values of the Student's *t* test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Crop	Var	n	R ²	Offset		Slope		RMSE (mm)	NRMSE (%)	MBE (mm)
				(-)	(mm)	(-)	(-)			
				Value	t test	Value	t test			
Wheat	SWC	52	0.77	113.86	0	0.68	0	30.93	9	5.33
Oats		30	0.95	-21.70	0.14	1.04	0.33	18.51	6	-8.05
Barley		7	0.95	72.63	0.05	0.84	0.11	28.17	8	18.71
Faba		55	0.76	48.99	0.05	0.84	0.01	31.98	9	-11.71

The comparison between simulated and in situ measurements of SWC (Figure 3.11 and Table 3.13), for each soil class, showed that the model well simulated SWC for the 3 soil classes, with a trend to underestimate observations for Vertisols and Cambisols and overestimate observations for Luvisols. The *R*² values were above 0.79, with a relative variation of approximately 12% across the three soil classes. The RMSE values ranged from 25 mm to 30 mm, and the regression slopes were lower than one, apart from Luvisols. For Luvisols, the *t* test provided *p* value larger than 5%. For Vertisols and Cambisols, the *t* test provided *p* values lower than 5%.

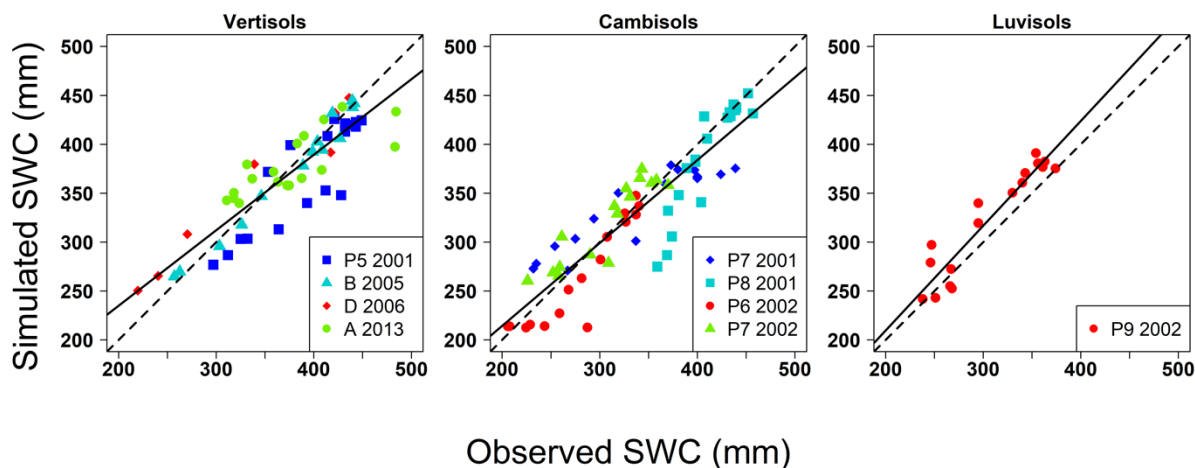


Figure 3.11 : Comparison between simulated and observed soil water content (SWC) on a soil class basis. Each scatterplot corresponds to a soil class for several plots, years and crops. Each dataset is indicated by a different marker and a different colour. *P*_{*x*}, *A*, *B*, *D* relates to plots and *YYYY* to years. The black line corresponds to the regression line, and the black dashed line corresponds to the 1:1 line.

Table 3.13 : Statistical indicators when comparing simulations against observations for soil water content (SWC) on a soil class basis. n is the observation number. R² is the correlation coefficient. The t test corresponds to the p values of the Student's t test. The statistical indicators RMSE, NRMSE and MBE are defined in Section 3.4.

Soil	Var	n	R ² (-)	Offset		Slope		RMSE (mm)	NRMSE (%)	MBE (mm)
				Value	t test	Value	t test			
Vertisols	SWC	59	0.79	80.77	0	0.77	0	28.41	8	-5.37
Cambisols		68	0.82	44.75	0.01	0.85	0	30.51	9	-6.69
Luvisols		17	0.89	-4.38	0.89	1.07	0.48	25.30	8	17.29

5. Discussion

5.1. Canopy cover (CC)

The large RMSE and NRMSE values on CC were ascribed to an overestimation of CC observations by AquaCrop simulations throughout the senescence phase. This overestimation could result from the fact that the model disregarded the effect of high temperatures on crop functioning during the senescence phase (Andarzian et al., 2011). First, AquaCrop accounted for the effect of heat stress (low and high temperatures) on the pollination and harvest index only. Second, the early senescence we observed was not due to water stress: the seasonal courses of ET_a and ET₀ observed for wheat in 2013 in plot A (Figure A.3 - annex A) started to diverge as of DAS 140 (19 Apr 2013), while senescence began at DAS 120 (30 Mar 2013). According to local farmers, early or sudden senescence of vegetation after heat waves has been observed in Kamech.

Other studies reported overestimations of field observations by AquaCrop for CC at the end of the crop cycle for wheat in arid / semiarid climates, with lower magnitudes (Andarzian et al., 2011; Sghaier et al., 2014; Toumi et al., 2016). Beyond such differences during the senescence, the method used to convert LAI to CC for cereals might be an additional source of uncertainty, since the conversion was calibrated on hemispherical photos and applied on planimetric measurements, both observation types leading to physical differences (Jonckheere et al., 2004).

5.2. Aboveground Biomass (AGB)

AquaCrop simulated AGB well, with an overestimation trend at the end of the crop cycle (e.g., faba bean, Figure A.2 - annex A). This could be ascribed to the overestimation of CC observations by AquaCrop simulations during the senescence phase in relation to a possible delay in senescence by model simulations. For faba bean plot P5 in 2001, this could not be shown due to the lack of CC measurements at the end of the crop cycle. However, Figure A.1 - Annex A indicates a recurrent overestimation of CC observations by AquaCrop simulations at the end of the crop cycle for different crop types and soil classes. Other studies have reported an overestimation of AGB observations by AquaCrop simulations, either at the end of the crop cycle (Katerji et al., 2013; Ahmadi et al., 2015; Sandhu and Irmak, 2019) or during the growth phase (Sghaier et al., 2014).

5.3. Actual evapotranspiration (ET_a)

AquaCrop showed acceptable performance in simulating ET_a for wheat and oats, with a trend to slightly overestimate observations. The overestimation of ET_a from DAS 130 (9 April 2013) for wheat and DAS 140 (3 May 2005) for oats could be related to the overestimation of CC observations during the senescence. Masasi et al. (2019) reported a similar trend for sorghum in a semiarid climate, and they suspected large atmospheric evaporative demand and poor characterizations of soil hydrodynamic parameters. Despite this overestimation in ET_a , AquaCrop well reproduced the divergence between ET_a and ET_0 courses at the end of the crop cycle.

The differences between simulated and observed ET_a values could also be due to (1) the eddy covariance measurements that tend to underestimate ET_a (Leuning et al., 2012; Boudhina et al., 2019), and (2) the reconstruction of missing ET_a data that induces uncertainties (Boudhina et al., 2018; Zitouna-Chebbi et al., 2018). Besides, Katerji et al. (2013) recalled that the ET_a calculation method in AquaCrop has been subject to several criticisms, especially when applied in semiarid Mediterranean regions (Katerji and Rana, 2006; Lovelli et al., 2007). A first source of error is assuming a constant surface resistance, since several studies in semiarid and arid regions have shown that it leads to underestimating ET_0 compared to lysimeter measurements (Katerji and Rana 2006). A second source of error is using the default value proposed by Allen et al. (1998) for cultural coefficient K_c , since several works reported differences up to 40% between this value and those observed in situ (Katerji and Rana 2006).

In contrast to the present study, previous works reported an underestimation for ET_a by AquaCrop for maize and tomato (Katerji et al., 2013) and for wheat (Toumi et al., 2016) in a Mediterranean climate. No explanation could be found for this contradiction. For two calibration plots, Toumi et al. (2016) reported RMSE values of 0.47 mm day^{-1} and 0.69 mm day^{-1} , which were similar to the RMSE value found in the current study for wheat in 2013 in plot A.

5.4. Runoff (R)

For wheat in plot P7 in 2001, wheat in plot P9 in 2002, and oat in plot P6 in 2002, AquaCrop simulated significant runoff values on DAS 19 (3 Dec 2000), DAS 2 (13 Dec 2001), and DAS 12 (11 Dec 2001), respectively. However, we could not evaluate AquaCrop simulations before the second half of December, due to the lack of in situ measurements. However, it was possible to verify the potential occurrence of runoff. According to Mekki (2003), rainfall greater than 20 mm day^{-1} is likely to generate runoff, regardless of surface conditions. Thus, the rainfall recorded on DAS 19 for plot P7 in 2001, DAS 2 for plot P9 in 2002, and DAS 12 for plot P6 in 2002 were equal to 40 mm, 20 mm, and 28 mm, respectively (data not shown), which could have produced runoff. This was also consistent with the slight increase of outlet lake level in early December (compared to mid-November, data not shown). Overall, the runoff simulations by AquaCrop early in the crop cycle were consistent with observations and expert knowledge.

For wheat in plot P9 in 2002 (DAS 10, 21 Dec 2001), wheat in plot A in 2013 (DAS 9, 09 Dec 2012), and oats in plot P6 in 2002 (DAS 20, 19 Dec 2001), we noted large values of model-simulated runoff early in the crop cycle, but we did not observe coincident runoff events from field observations. We observed the same difference between simulated and unobserved peak runoff at the end of the crop cycle, for wheat in 2013 in plot A and for oats in 2002 in plot P6. This could be explained by the presence of shrinkage cracks, which are known to generate preferential infiltration at the expense of runoff (Inoubli et al., 2017).

Wolka et al. (2021) reported one of the few assessments on the ability of AquaCrop to simulate runoff. They noted that AquaCrop simulated runoff with RMSE values ranging from 9.8 mm to 61.5 mm. However, it was difficult to compare these results with ours, because of larger rainfall and runoff accumulations for Wolka et al. (2021).

5.5. Soil water content (SWC)

AquaCrop showed good performance in simulating soil water content. For oats, the underestimation of SWC observations was ascribed to the overestimations of ET_a and runoff.

The differences between simulations and observations could be due to (1) inaccurate soil moisture initialisations, (2) poor characterizations of soil hydrodynamic properties (HWP and HFC) and (3) inadequate AquaCrop formalisms when simulating water fluxes (ET_a , runoff, drainage). Additionally, disregarding capillary rise was not critical because most plots were located at slope tops and therefore relatively far from possible shallow aquifers. Overall, the errors in SWC simulations were ascribed to the characterization of soil hydrodynamic properties (HWP and HFC), given the accuracies of AquaCrop simulations for water fluxes and crop variables.

Previous studies reported overestimations of SWC observations by AquaCrop simulations, notably for wheat (Andarzian et al., 2011), maize (Nyakudya and Stroosnijder, 2014) and barley (El Mokh et al., 2017). These overestimations were often noticed during dry periods, which can be explained by constraints on SWC, since the latter cannot drop below HWP.

5.6. Analysis by crop type and soil class

When dealing with AquaCrop performance according to crop type, AquaCrop could be used for predicting crop growth and biomass production. Oat crops could be used as animal fodder, which is a common practice within Kamech and the surrounding region, with subsequent grazing and cutting operations throughout the crop cycle. However, AquaCrop does not account for the dynamics of the crop canopy induced by such agricultural practices. Nyathi et al (2018) tried to parameterize this practice for leafy vegetables, by performing independent simulations for any crop and assuming that the initial canopy cover (CC0) was reset according to the remaining canopy cover (from 1 to 2%) after each harvest.

When dealing with AquaCrop performance according to soil class, the analysis of model simulations permitted us to draw partial conclusions only. The analysis of the model outputs for the AGB and SWC showed an acceptable performance in simulating these two variables across all soil classes. For runoff and CC, the best results were observed with Vertisols and Cambisols, respectively. For ET_a , for which we had measurements on Vertisols only, no conclusion can be drawn regarding AquaCrop performance according to soil class.

When dealing with linear regressions on validation for both crop types and soil classes, the t test provided p values larger than 5% for most cases (e.g., AGB, CC, SWC), which indicated that AquaCrop performances could be considered satisfactory. For some crop/soil combinations, the t test provided p values lower than 5% (e.g., ET_a , R, SWC), although the offset remained relatively low (e.g., ET_a and SWC offset for oats and Cambisols, respectively).

5.7. Main outcomes

To our knowledge, the present work is the first study using AquaCrop for faba bean and oats in a semiarid Mediterranean climate. According to the results we obtained, AquaCrop can acceptably simulate the functioning of these two crops by using crop parameters available in the literature. Additionally, AquaCrop simulations are acceptable for various combinations of soils and crops across contrasted hydroclimatic years.

Although there were gaps in database on which the current study relied, it was rich enough to draw several lessons. According to the results we obtained, the model performance was closely related to the formalism used for simulations. AquaCrop showed good performance in simulating biomass and soil water content for all crops, on the basis of parameterizations and forcing (1) that were as adequate as possible for the crops and soils to be studied, and (2) that were in line with literature recommendations. The performance of the model was moderate for the simulation of CC, with a possible delay in senescence for most of the crops we addressed. The model showed acceptable performance in simulating ET_a , although it was delicate to conclude according to the dataset size (2 years - plots).

Runoff was poorly simulated at both the beginning and end of the crop cycle because of shrinkage cracks for clay soils. Soil cracking is a complex phenomenon that is very difficult to include in numerical modelling, especially in simplified models. Runoff simulations were acceptable for the other stages of the crop cycle when the cracks were closed. Despite this, the simulations were acceptable to simulate the dynamics of soil water content and crop variables (AGB), as shown in Figs. 4-5-9-10 and Tabs 5-6-10-11, which was ascribed to the moderate influence of runoff on the soil water balance. However, in the perspective of agro-hydrological studies that require the consideration of lateral fluxes between the different components of the cultivated landscape (Van Loo and Verstraeten, 2021), the runoff modelling by AquaCrop was no longer acceptable for our study site, and it will be necessary to consider a more realistic runoff-infiltration partitioning model.

6. Conclusion

For some soil/crop combinations that have been little studied to date, AquaCrop can acceptably simulate their functioning in terms of vegetation growth and water consumption, as well as in terms of soil water balance, by using parameters available in the literature. Additionally, AquaCrop can simultaneously simulate several variables in an acceptable manner, namely,

aboveground biomass, evapotranspiration, and soil water content. We highlight some limitations of AquaCrop in terms of vegetation cover and runoff in relation to delayed senescence and disregard of swelling soils, respectively.

The results of the current study are in good agreement with those reported in the literature, knowing that the previous studies mainly addressed flat terrains. Our study also showed that AquaCrop was able to acceptably simulate crop dynamics and water fluxes for contrasted hydroclimatic years, with a slight dependence on soil class and a significant dependence on crop type, including large differences from one variable to another.

Our results open the path for further use of AquaCrop in the Mediterranean context, on which we focused, with forthcoming efforts on water availability and water productivity in relation to plot hydrological connectivities within hilly terrains.

Chapitre 4 : Connectivité hydrologique : quel effet sur le fonctionnement des cultures ?

Une fois que les capacités du modèle AquaCrop à simuler un ensemble de variables agronomiques et hydrologiques, dans un contexte d'agriculture pluviale collinaire méditerranéenne sont validées, nous utilisons le modèle pour étudier l'effet de la connectivité hydrologique inter-parcellaire (transferts d'eau latéraux par ruissellement de surface) sur le fonctionnement des cultures, en lien avec la dynamique de l'eau dans le sol.

- Nous commençons ce chapitre par une brève introduction qui rappelle les points discutés dans les chapitres précédents et qui présente les objectifs.
- La deuxième partie du chapitre détaille les outils méthodologiques utilisés : (1) la démarche générale adoptée pour étudier l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures, (2) le plan d'expérimentation numérique, avec une description détaillée des différents facteurs d'influence considérés ainsi que les différentes étapes dudit plan d'expérimentation, et (3) la méthode d'analyse des données.
- Nous présentons dans la troisième partie les résultats des simulations. Nous présentons d'abord une analyse du ruissellement amont simulé. Nous étudions ensuite la sensibilité des variables agronomiques et hydrologiques vis-à-vis de la connectivité inter-parcellaire et d'autres facteurs que nous choisissons pour leurs influences de premier ordre. Nous finissons par quantifier l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures.
- Nous discutons dans la quatrième de (1) l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures en fonction des conditions environnementales et (2) le poids relatif des différents facteurs d'influences considérés sur les variables et indicateurs du fonctionnement agro-hydrologiques étudiés.
- Nous finissons ce chapitre par une conclusion générale.

Cette partie fait l'objet d'un article à comité de lecture en cours de préparation et que nous prévoyons de soumettre à *Agronomy for Sustainable Development*.

1. Introduction

Comme discuté dans le chapitre 1, la modélisation numérique est une approche appropriée pour étudier le fonctionnement hydrologique et agronomique des paysages agricoles méditerranéens

à différentes échelles spatiales (de la parcelle au bassin versant) et sur différentes périodes temporelles (climat actuel et futur).

Nous avons aussi discuté en détail les avantages du couplage entre modèle de culture et modèle hydrologique pour simuler la relation entre le cycle de l'eau et le cycle de la culture. La relation entre les deux cycles repose, entre autres, sur les transferts d'eau latéraux par ruissellement via la connectivité hydrologique entre les parcelles, et qui peuvent impacter l'humidité du sol des parcelles aval et donc la production agricole afférente. En effet, l'eau ruisselée depuis l'amont d'un versant peut se ré-infiltrer dans les sols aval au cours de son acheminement vers l'exutoire (Van Loo et Verstraeten, 2021), constituant ainsi de l'eau verte supplémentaire disponible pour les cultures, voire de l'eau bleue dans les nappes phréatiques s'il y a percolation. Les flux d'eau ruisselés en surface entre les parcelles, qui constituent ce que nous appelons ici la connectivité hydrologique inter-parcellaire, dépendent de plusieurs facteurs dont la pluie (cumul, intensité), la taille de l'aire contributive amont, le sol (texture, profondeur, état de surface) et le couvert végétal, sur le transect amont -aval.

Cette ré-infiltration des eaux de ruissellement au niveau des zones aval peut être prise en compte dans un modèle agro-hydrologique lorsque le modèle de culture est couplé à un modèle hydrologique distribué (chapitre 1). Toutefois, si l'effet de la connectivité hydrologique sur les différentes composantes du cycle de l'eau a été largement étudié, son impact sur le fonctionnement agronomique des cultures n'a pas été abordé dans la littérature, à notre connaissance. La compréhension préalable du rôle que joue la connectivité inter-parcellaire dans le fonctionnement de la culture peut conditionner le choix parcimonieux de la méthode du couplage des modèles (chapitre 1, section 7.3 et chapitre 2 section 2), qui peut, selon la méthode, être plus ou moins difficile à implémenter.

L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier l'effet de la connectivité hydrologique inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures en lien avec la dynamique de l'eau dans le sol. Ceci nous permettra :

- (1) d'évaluer le poids relatif de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures par rapport à d'autres facteurs d'influence, tels que la texture et la profondeur du sol, ou les conditions climatiques (en particulier la pluviométrie) ; et
- (2) d'évaluer l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures en fonction des conditions environnementales aval, relatives au climat et à la pédologie.

2. Matériels et méthodes

2.1. Démarche générale

Comme discuté dans le chapitre 2, section 1 et 2, nous évaluons l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures par le biais du modèle de culture AquaCrop, capable de simuler à la fois la croissance et le développement de la culture, et le bilan hydrique du sol avec ses différentes composantes. Les capacités d'AquaCrop à simuler le fonctionnement agronomique des cultures, en relief collinaire, en considérant différentes combinaisons de cultures et de sols caractéristiques de l'agriculture pluviale méditerranéenne ont été évaluées préalablement dans le chapitre 3.

Pour répondre à l'objectif de cette partie, nous avons décidé de travailler sur un versant constitué de deux parcelles connectées, une en amont correspondant à l'impluvium amont (notée Am) et une en aval (notée Av) recevant de l'eau ruisselée de la parcelle Am (Figure 4.1). Avec cette configuration, nous prenons en compte la connectivité inter-parcellaire en supposant que la parcelle Av reçoit la totalité du ruissellement simulé au niveau de la parcelle Am. La connectivité inter-parcellaire est donc représentée d'une manière simple, en supposant que le flux d'eau incident sur la parcelle Av est égale à la somme des précipitations et de la lame d'eau ruisselée au niveau de la parcelle Am, simulée par AquaCrop. Nous utilisons des chroniques de ruissellement simulées et non pas observées afin de considérer une large variabilité des flux de ruissellement amont au regard des conditions environnementales de la parcelle amont (texture et profondeur du sol, conditions d'humidité du sol, couvert végétal) et de la pluie. Nous supposons aussi que le régime pluviométrique est le même au sein du versant étudié, quelque soit la taille de la parcelle Am.

Comme discuté dans le chapitre 1, section 3.3.1, les flux de ruissellement venant de l'amont sont influencés par plusieurs facteurs environnementaux. Parmi ces facteurs, nous en avons choisi cinq : le climat, la texture du sol, la profondeur du sol, la culture et l'aire contributive amont.

Comme discuté dans le chapitre 1, section 5.2, la productivité agricole est influencée par plusieurs facteurs environnementaux. Dans ce présent travail, nous considérons que la production agricole pour une culture donnée au niveau de la parcelle Av est influencée par le climat, la texture et la profondeur du sol. Nous avons choisi ces facteurs au vu de leur influence sur le fonctionnement de la culture en lien avec l'eau disponible pour la plante. Nous avons aussi décidé de travailler sur différentes cultures afin de prendre en compte la variabilité du fonctionnement végétal sous l'influence de la connectivité inter-parcellaire.

Pour prendre en compte une diversité de configurations possibles pouvant influencer le ruissellement amont, nous considérons, pour la parcelle Am, plusieurs combinaisons de culture, de texture, de profondeur du sol et d'aire contributive amont. Pour la parcelle Av, nous considérons, pour une culture donnée, plusieurs combinaisons possibles de texture et de profondeur du sol (Figure 4.1). Les simulations sont réalisées sur une période suffisamment longue pour englober la variabilité inter-climatique de la région étudiée.

Comme première étape, et afin de faciliter l'analyse des résultats, nous considérons que la parcelle Av est cultivée en monoculture pendant toute la période d'étude. Les différents facteurs croisés pour chacune des parcelles Am et Av sont résumés dans la Figure 4.1. Plus de détails concernant les différentes valeurs de chaque facteur considéré sont donnés dans la section suivante.

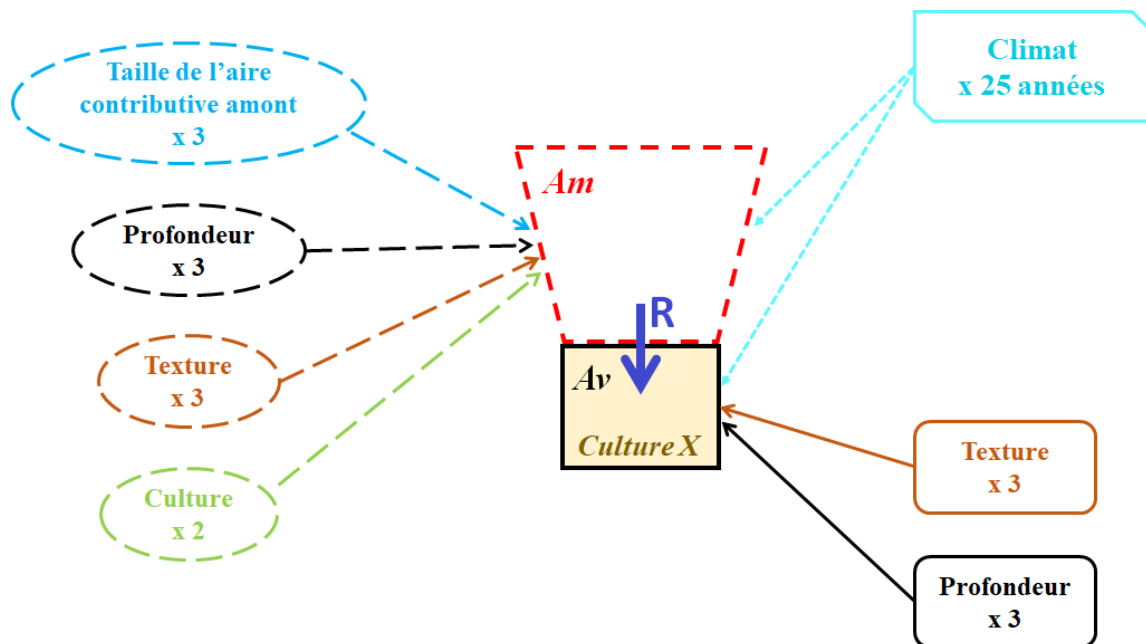


Figure 4.1 : Schéma représentatif de la disposition spatiale des deux parcelles amont (Am) et aval (Av) connectées avec le flux de ruissellement en provenance de l'amont ainsi que les différents facteurs croisés pour chaque parcelle. Le détail des différentes valeurs de chaque facteur d'influence est donné dans la section 2.2. Ce schéma représente le plan d'expérimentation numérique pour une seule culture en aval, et il sera reproduit pour chaque culture choisie à l'aval.

Pour rester dans un contexte d'agriculture pluviale méditerranéenne, en relief collinaire, nous avons décidé de travailler avec des propriétés agro-pédo-climatiques caractéristiques du bassin versant de Kamech (chapitre 2, section 4). Autrement dit, nous utilisons dans nos simulations des

types de sol (textures et profondeur) et de culture rencontrés dans Kamech, ainsi que des données climatiques, mesurées au sein de ce bassin versant.

Nous donnons ci-dessous des informations générales sur chaque facteur d'influence considéré. Les informations détaillées sont fournies en Section 2.2 qui présente le plan d'expérimentation numérique.

L'aire contributive amont : ce facteur représente la superficie de l'impluvium amont qui produit le ruissellement. Dans cette étude, nous supposons que l'aire contributive amont correspond à la superficie totale de l'impluvium amont, autrement dit, toute la superficie de l'impluvium amont participe au ruissellement. Ce facteur est représenté par le rapport de l'aire de l'impluvium amont à l'aire de la parcelle considérée, noté α .

Les cultures : comme expliqué dans le paragraphe précédent, le but de travailler sur deux cultures est (1) de considérer l'influence du couvert végétal sur le ruissellement amont, et (2) d'étudier la sensibilité du fonctionnement de la culture située sur la parcelle Av à la connectivité inter-parcellaire). De ce fait, il est important de choisir deux cultures différentes en termes de caractéristiques morphologiques, de cycle phénologique et de pratiques agricoles (dates de semis, mode de semis, etc). Il est aussi important de choisir des cultures caractéristiques de l'agriculture pluviale méditerranéenne.

Le sol : étant donné qu'en milieu semi-aride l'eau est le principal facteur limitant la production végétale, nous avons décidé de considérer le réservoir utile comme élément caractéristique du sol. Ce dernier est décrit par la profondeur du sol et la texture (chapitre 1, section 3.1.1). La texture d'un sol détermine ses propriétés hydrodynamiques définies par l'humidité du sol au point de flétrissement permanent (PWP, pour *permanent wilting point*), l'humidité du sol à la capacité au champ (FC pour *field capacity*), l'humidité du sol à saturation (Sat) et la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}).

Le climat : pour considérer l'influence de la variabilité inter et intra-annuelle des conditions climatiques, en particulier celle de la pluviométrie, sur la genèse du ruissellement amont ainsi que le fonctionnement de la culture sur la parcelle Av, nous avons décidé de travailler sur une série d'années constituée de 25 années climatiques, qui constitue le maximum d'années dont nous disposons.

Pour faciliter l'analyse des résultats, nous caractérisons le climat selon un indice d'aridité (AI pour *aridity index*) qui dépend des quantités d'eau disponibles (Nastos et al., 2013). Il existe dans

la littérature différentes méthodes de calcul d'AI. Parmi tous les indices existants, nous choisissons 2 indices : l'indice de Martonne (AIM) (Martonne, 1927), couramment utilisé dans la littérature, et l'indice d'aridité de la FAO (AIF) (Spinoni et al., 2014) du fait que nous utilisons le modèle AquaCrop, développé par le même organisme. Ces deux indices sont calculés selon l'équation 4.1 et 4.2 :

$$AIM = \frac{P}{T_a + 10} \quad (4.1)$$

$$AIF = \frac{P}{ET_0} \quad (4.2)$$

L'indice de Martonne définit AI comme étant le rapport entre le cumul annuel de pluie (P) et la température de l'air moyenne annuelle (Ta). L'indice de la FAO définit AI comme étant le rapport entre le cumul annuel de pluie (P) et le cumul annuel de l'évapotranspiration de référence (ET₀). Les différentes classes de AIM et de AIF sont indiquées dans le Tableau B.1 de l'annexe B. La normalisation de P par ET₀ dans AIF permet de prendre en compte l'effet des différentes variables climatiques impliquées dans ET₀, et pas seulement l'effet de la température de l'air comme c'est le cas pour AIM. De plus, dans AquaCrop, la biomasse aérienne sèche est déterminée en fonction de la transpiration végétale qui dépend de ET₀ (chapitre 2, section 3). Pour ces deux raisons, nous avons décidé de classer les années climatiques selon AIF. Le résultat de classification de la série climatique utilisé dans ce travail par les deux indices AIM et AIF est donné dans la Figure B.1 de l'annexe B.

Au final, l'analyse des simulations est basée sur l'étude des variables (simulations AquaCrop) et indicateurs (combinaison de variables simulées par AquaCrop et relatives au forçage climatique) suivants.

- Variables de production agricole : biomasse aérienne sèche et rendement.
- Indicateurs de fonctionnement hydrologique : coefficient de ruissellement et coefficient de percolation (voir détail de calcul dans la section 2.2).
- Indicateurs de fonctionnement agronomique : efficacité agronomique de l'eau (WUE pour *water use efficiency*). Nous calculons WUE de deux manières différentes à partir (1) de la biomasse aérienne sèche (WUE_{AGB}, avec AGB pour *aboveground biomass*) et (2) du rendement (WUE_{Yld}, avec Yld pour *Yield*). Nous avons décidé de considérer ces deux

WUE car WUE_{YId} diffère de WUE_{AGB} via les variations de l'indice de récolte (HI), qui est un paramètre sensible au stress hydrique.

2.2. Expérimentation numérique

2.2.1. Facteurs à prendre en compte

2.2.1.1. Variables de forçage climatique

Pour rappel, AquaCrop requiert des données journalières (1) de températures maximales et minimales, (2) d' ET_0 et (3) de pluviométrie. Pour ce chapitre, nous utilisons des données de forçage climatiques collectées au niveau de la station météorologique, située à l'exutoire du bassin versant de Kamech. Les détails d'acquisition de ces données sont discutés dans le chapitre 2, section 4.2.1 et dans le chapitre 3, section 3.2.1.1.

Comme discuté dans la section 2.1, nous avons décidé de travailler sur une série d'années climatiques afin de prendre en compte l'effet de la variabilité inter et intra-annuelle des variables du forçage climatique, en particulier la pluviométrie, sur le ruissellement amont et la production des cultures sur la parcelle aval (Av). Cette série s'étale sur 25 années hydrologiques successives, allant du 1er septembre 1995 au 31 août 2019.

Pour caractériser la série des années climatiques sur laquelle nous travaillons, nous avons calculé les cumuls annuels de pluie, les températures moyennes annuelles (moyenne des températures journalières qui sont, elles même calculées en moyennant la température minimale et maximale de chaque journée) et les cumuls annuels de l'évapotranspiration de référence (ET_0) entre 1995 et 2019 (Figure 4.2). Les températures moyennes sont calculées entre le mois d'octobre et le mois de mai, correspondant à la période entre le semis et la maturité des cultures, dans la région d'étude. En dehors de cette période, la température n'a pas d'effet sur le cycle de la culture. Nous calculons les cumuls de P et de ET_0 sur l'année entière, car ces deux variables impactent le stock hydrique du sol, important pour la culture de l'année suivante.

Entre 1995 et 2019, les moyennes annuelles de la pluviométrie, de température et de l' ET_0 sont égales à 629 mm, 14.8°C et 1310 mm, respectivement. D'après la Figure 4.2, nous observons une variabilité interannuelle plus importante pour les cumuls de pluie et les températures moyennes que pour les cumuls d' ET_0 . Les années 1996 et 2019 sont les années les plus humides avec des cumuls de précipitations annuels de 1036 mm et 862 mm, respectivement. Les années 1997, 2002 et 2016 sont les années les plus sèches avec des cumuls de précipitations annuels de 406 mm, 394 mm et 416 mm, respectivement. Pour les températures, les années 1999 et 2009 sont les années les plus froides avec des températures moyennes entre le mois d'octobre et le

mois du mai de 14.2°C. Les années 2001, 2002 et 2007 sont les années les plus chaudes avec des températures moyennes entre le mois d'octobre et le mois de mai de 15.4°C.

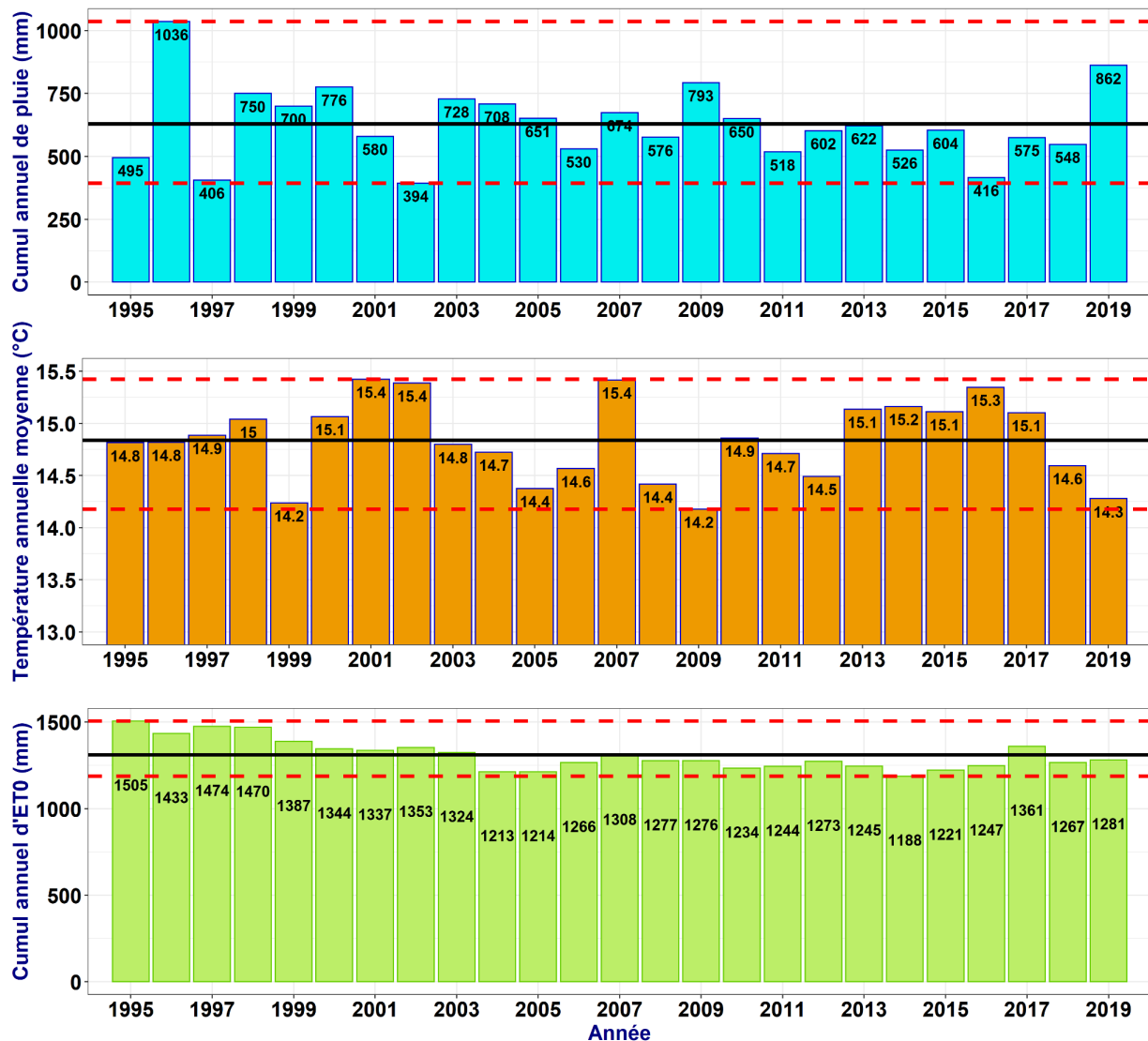


Figure 4.2. : Cumuls annuels de pluie (1ère ligne), température annuelle moyenne (2ème ligne) et d'évapotranspiration de référence (ET0) (3ème ligne). Les températures moyennes annuelles sont calculées entre le mois d'octobre et le mois de juin, période correspondante au cycle de culture dans la région. La ligne noire continue est la moyenne des variables sur les 25 ans et les lignes rouges discontinues sont les maxima et minima des cumuls sur les 25 ans.

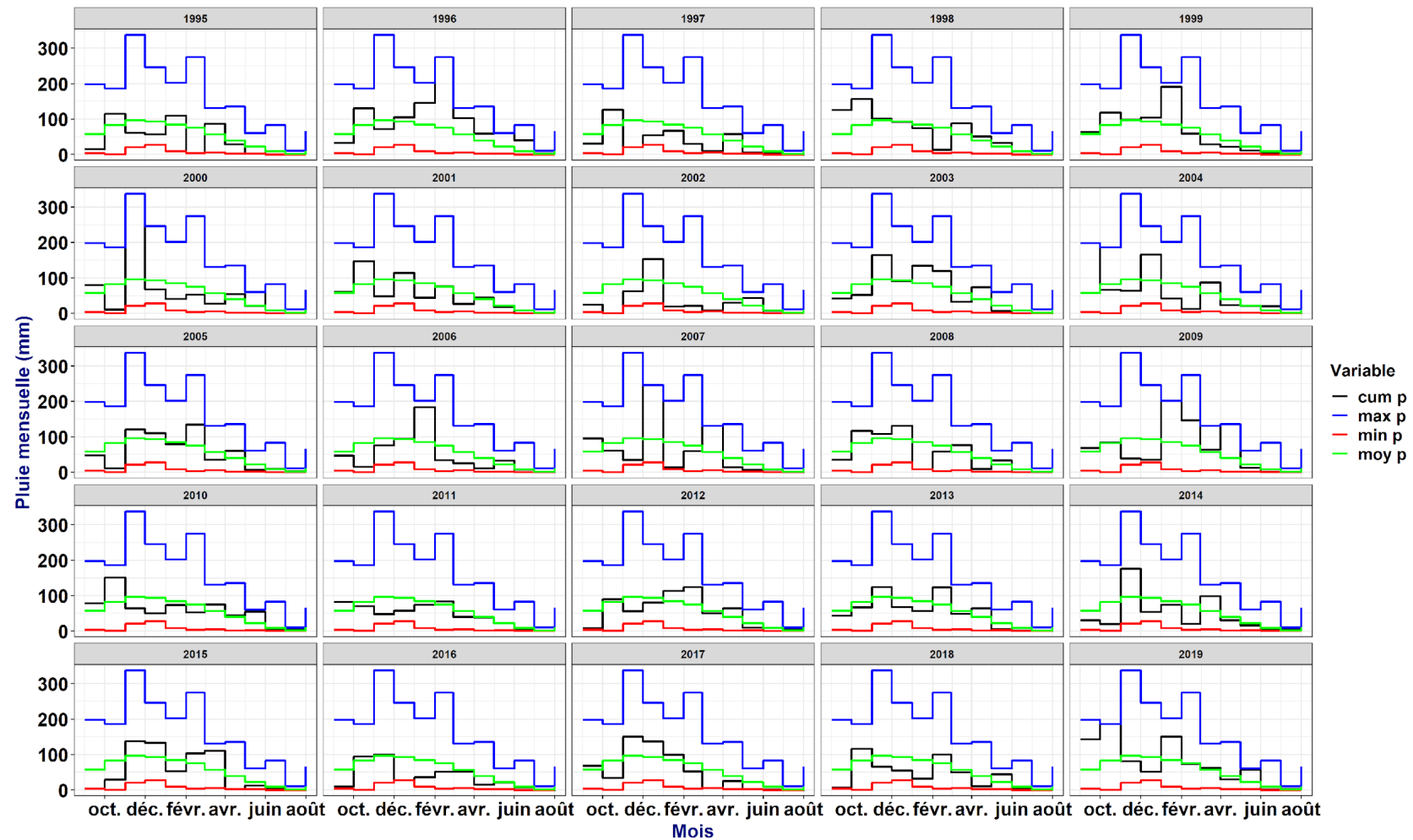


Figure 4.3. : Variabilité temporelle des cumuls mensuels de pluie, sur 25 années, entre 1995 et 2019. Cum p (courbe noire) représente les cumuls mensuels observés à l'année X, moy p (courbe verte) représente les cumuls mensuels moyens sur la période étudiée, max p (courbe bleue) représente les cumuls mensuels maximums observés en 25 ans et min p (courbe rouge) représente les cumuls mensuels minimums observés en 25 ans (année hydrologique de septembre année [n-1] à août [n]).

La classification des années climatiques considérées pour ce travail, selon l'indice d'aridité AIF (Figure 4.4) montre que notre série climatique est composée de deux années subhumides (SH, AIF ∈]0.65 - 0.75]), 10 années subhumides sèches (SHS, AIF ∈]0.50 - 0.65]) et 13 années semi-arides (SA, AIF ∈]0.20 - 0.50]), soit une répartition de 8 %, 40 % et 52 %, respectivement.

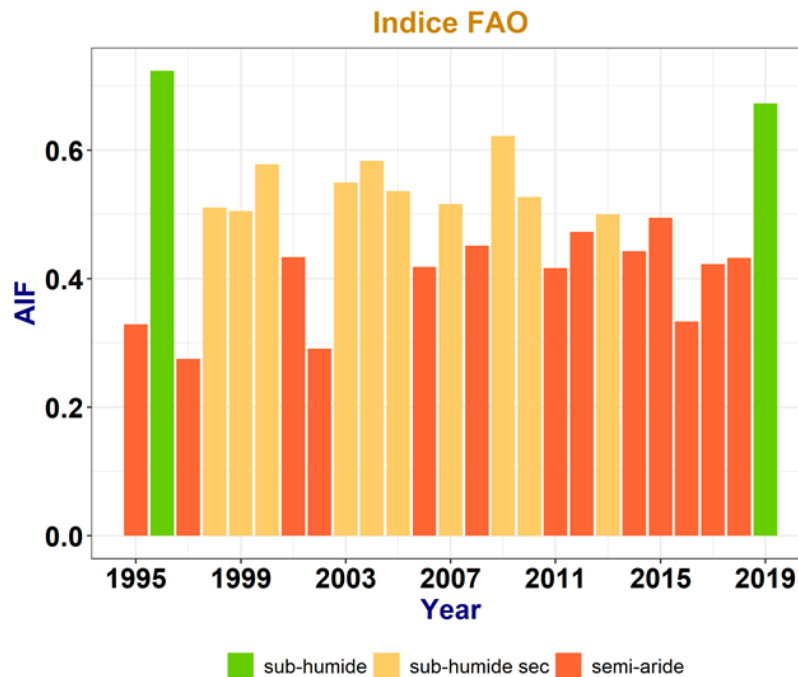


Figure 4.4 : Classification des années climatiques selon l'indice d'aridité de la FAO (AIF).

2.2.1.2. Facteurs pédologiques

Comme expliqué précédemment, nous caractérisons le sol par sa profondeur et sa texture. Afin de déterminer les textures de sol dominantes à Kamech, nous avons analysé les données de 10 fosses pédologiques réalisées en différentes localisations au sein du bassin versant dans le cadre du projet MASCC (Coulouma et al., 2017). L'analyse de ses données conduit à trois textures dominantes, selon le triangle de classification de l'USDA : Clay (C), Clay-Loam (CL) et Sandy-Clay-Loam (SCL). Les propriétés hydrodynamiques utilisées dans cette étude, pour chacune de ces textures du sol, sont renseignées directement en se basant sur les valeurs proposées dans le guide de l'utilisateur d'AquaCrop (Tableau 4.1).

Afin d'étudier l'effet de la profondeur du sol sur la productivité végétale, nous avons fixé trois profondeurs différentes : 0.5 m, 1 m et 1.5 m. Ces valeurs sont choisies car observées dans le site d'étude. En effet, les profondeurs du sol à Kamech varient de quelques centimètres à deux mètres de profondeur (Molénat et al., 2018).

Tableau 4.1 : Propriétés hydrodynamiques du sol. C, CL et SCL correspondent au Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. PWP, FC, Sat et K_{sat} correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent, l'humidité du sol à la capacité au champ, l'humidité du sol à saturation et la conductivité hydraulique à saturation, respectivement.

Texture	Propriétés hydrodynamiques			
	PWP (m ³ /m ³)	FC	Sat	K _{sat} mm/j
C	0.39	0.54	0.55	35
CL	0.23	0.39	0.50	125
SCL	0.20	0.32	0.47	225

2.2.1.3. Paramètres de cultures et choix des dates de semis

Pour les cultures, nous avons décidé de travailler sur deux cultures différentes : le blé comme céréale à grains, et la fève comme légumineuse. Ces deux cultures sont parmi les principales cultures pluviales non seulement au sein du bassin versant de Kamech (Mekki et al., 2006), mais aussi en Méditerranée (FAO, 2022). Le blé et la fève sont très différents notamment en termes de durée du cycle phénologique et de pratiques agricoles (date de semis, date de récolte) ainsi qu'en termes de propriétés fonctionnelles au niveau hydrologique (taux différent de couverture du sol impliquant des partages infiltration-ruissellement différents). La fève est une culture en rang avec un cycle phénologique court tandis que le blé est une culture couvrante dotée d'un cycle phénologique plus long que celui de la fève.

Les paramètres cultureux adaptés au blé et à la fève de la zone d'étude sont donnés dans le Tableau B.2, annexe B.

La date de semis est un paramètre primordial du modèle. Fixer cette date pour chaque année et pour chaque culture est donc une étape importante de la modélisation. Une date de semis optimale est une date qui permet 1) d'éviter l'échec de la germination dû à un manque d'eau au début du cycle et 2) d'éviter la réduction du temps nécessaire à la croissance due à un semis tardif (Laux et al., 2010 ; Waongo et al., 2015). Dans la présente étude, nous avons respecté les règles de semis adoptées au sein de la zone d'étude pour la culture du blé et de la fève. Pour une année donnée, la date de semis est fixée en respectant :

- la période de semis dans la région : le semis doit être réalisé dans la période allant du 20 octobre au 15 décembre pour le blé et dans la période entre début novembre et fin décembre pour la fève ;

- le cumul de pluie depuis le début de la saison pluvieuse : choisir la première date pour laquelle le cumul de pluie (calculé à partir du 01 septembre) est supérieur ou égal à 200 mm ;
- la quantité de pluie journalière à la date choisie : on reporte de 5 jours la date de semis si le cumul de pluie journalier à la date choisie est très important (supérieur à 20 mm).

Pour la fertilisation du blé, nous avons considéré le même taux de fertilisation adopté dans l'évaluation d'AquaCrop (chapitre 3), soit un taux de fertilisation de 85%. Pour la fève, légumineuse fixatrice d'azote, aucune fertilisation n'est nécessaire.

2.2.1.4. Aire contributive amont

Comme discuté dans la section 2, l'aire de l'impluvium amont, appelée aussi aire contributive amont, fait partie des facteurs influençant le flux de ruissellement amont. Dans la présente étude, nous représentons ce facteur par le rapport α qui n'est autre que le rapport de l'aire contributive amont (l'aire de l'impluvium amont) à l'aire de la parcelle considérée. L'influence de ce rapport est testée avec 3 valeurs différentes : 0.5 (aire contributive amont = 0.5 x aire parcelle aval), 1 (aire contributive amont = aire parcelle aval) et 2 (aire contributive amont = 2 x aire parcelle aval) (Figure 4.5).

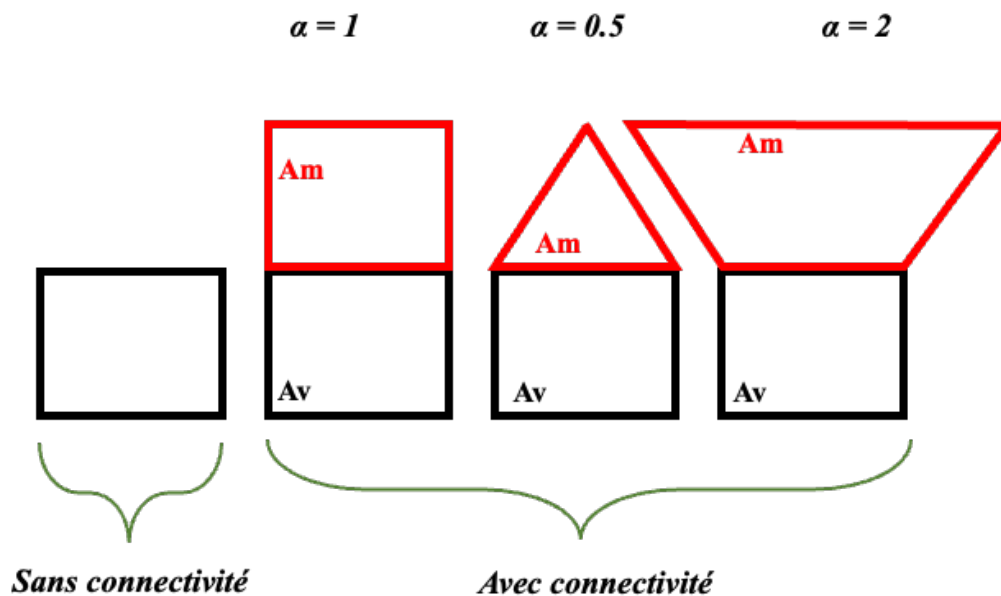


Figure 4.5 : Différentes configurations impluvium amont (Am) - parcelle aval (Av).

2.2.2. Plan de simulation numérique

Pour évaluer l'influence de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement d'une culture donnée (blé ou fève), se trouvant sur la parcelle Av, nous réalisons le plan numérique suivant, se composant de quatre principales étapes (Figure 4.6).

- Étape 1 : fixation des différentes valeurs des facteurs d'influences considérés (section 2.2.1).
- Étape 2 : nous simulons le flux de ruissellement venant de l'amont. Pour cela, une fois les différentes valeurs des facteurs d'influences fixées, nous réalisons des simulations sur une seule parcelle non connectée (parcelle Am), en prenant en compte toutes les combinaisons possibles de textures (3 textures), de profondeurs du sol (3 profondeurs) et de cultures (2 cultures), sur 25 ans. À l'issue de cette étape, nous obtenons pour chacune des 18 combinaisons de texture/profondeur/culture, une chronique du flux ruisselé sur 25 ans.
- Étape 3 : la troisième étape consiste à considérer le flux ruisselé, simulé dans l'étape 2, comme un flux généré sur la parcelle Am qui peut se ré-infiltrer au niveau de la parcelle Av. Ce flux ajouté aux précipitations, sera considéré comme un flux d'eau incident, à la limite supérieure de la parcelle Av. Concrètement, les lames d'eau ruisselées (par unité de surface) issues des simulations de la deuxième étape sont multipliées par les différentes valeurs du rapport α (3 valeurs). À l'issue de cette étape, nous obtenons 54 chroniques de ruissellement amont sur 25 ans, correspondant à 18 combinaisons texture/profondeur/ culture de la parcelle Am multipliées par 3 valeurs du rapport α , et nous les additionnons à la chronique de pluviométrie sur 25 ans pour la parcelle Av.
- Étape 4 : ensuite, nous réalisons les simulations pour la parcelle Av, et ce pour les 54 chroniques de ruissellement amont que nous croisons avec les 9 combinaisons de texture/profondeur de la parcelle Av (Figure 4.1 et Tableau 4.2). À l'issue de cette étape, nous obtenons, pour la parcelle Av, cultivé en blé ou en fève, 486 simulations sur 25 ans chacune. En sus de ces 486 simulations AquaCrop pour la parcelle Av, avec connectivité, nous considérons les 18 simulations issues de l'étape 2 pour la parcelle Am, et qui sont équivalentes à des simulations pour la parcelle Av sans connectivité.

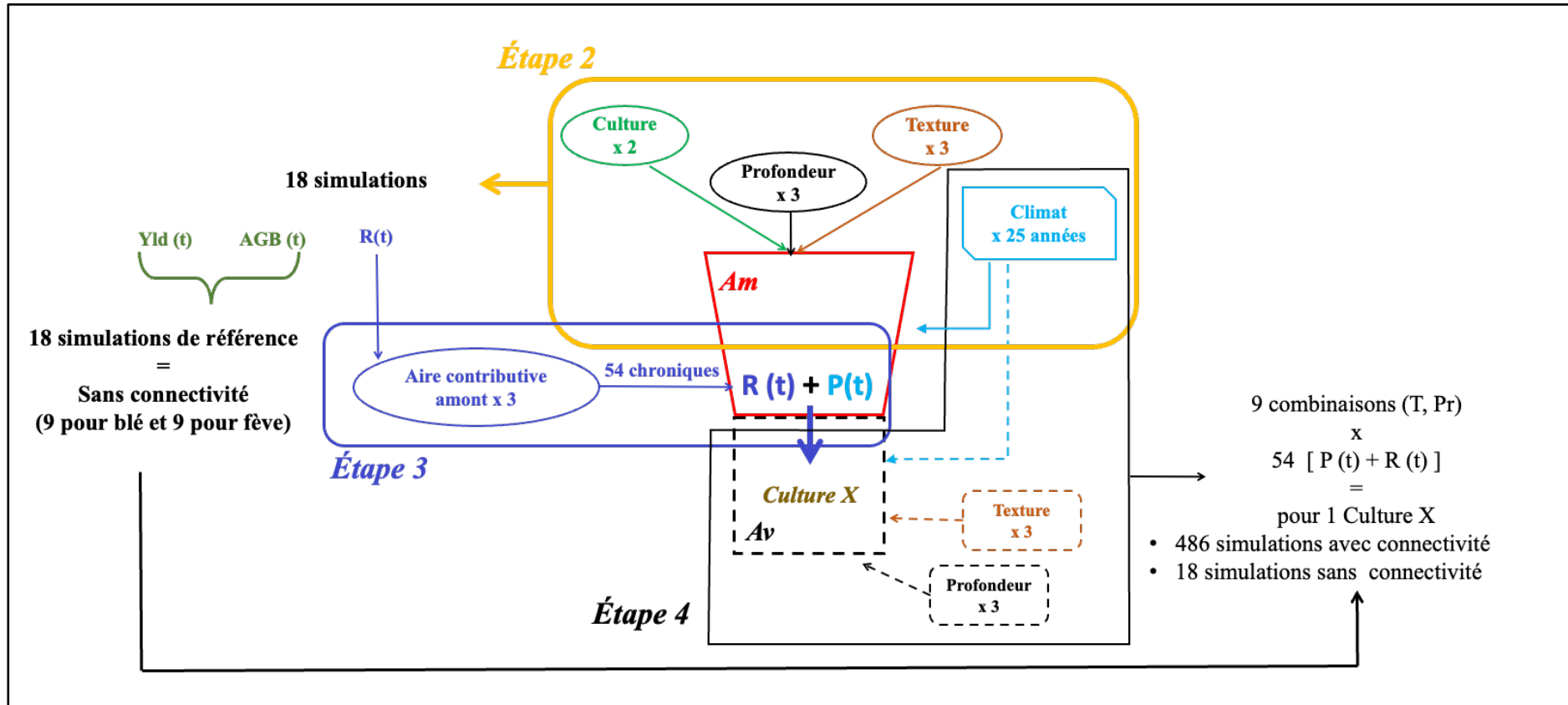


Figure 4.6 : Différentes étapes du plan d'expérience numérique réalisé dans le présent travail de thèse. L'étape 1 n'apparaît pas dans la figure car elle consiste à fixer les différentes valeurs de chaque facteur d'influence. $AGB(t)$, $Yld(t)$, $R(t)$ et $P(t)$ correspondent aux chroniques de biomasse aérienne sèche, du rendement, du ruissellement amont et de la pluviométrie, respectivement, sur 25 années. Am et Av correspondent à la parcelle amont et la parcelle aval, respectivement. T et Pr correspondent à la texture et à la profondeur du sol, respectivement. La culture X signifie fève ou blé. En sus de la pluviométrie, le fichier climat contient des données de température de l'air, d'évapotranspiration de référence et de concentration en CO_2 atmosphérique.

Tableau 4.2 : Récapitulatif des différentes valeurs pour les facteurs d'influence considérées dans chaque étape de simulation. C, CL et SCL correspondent au Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Am et Av correspondent à la parcelle amont et à la parcelle aval, respectivement. R correspond au ruissellement amont. Cu, P et Tr correspondent à la culture, de la texture et à la profondeur du sol, respectivement. α correspond au rapport entre l'aire contributive amont et l'aire de la parcelle aval.

Étape de la simulation	Culture (Cu)	Texture du sol (T)	Profondeur du sol (Pr, m)	Aire contributive amont (α)	Nombre de combinaisons
Parcelle Am	{Blé, fève}	{C, CL, SCL}	{0.5, 1, 1.5}	{0.5, 1, 2}	$2C_u \times 3T \times 3Pr \times 3\alpha =$ ➤ 54 chroniques de R sur 25 ans
	Blé	{C, CL, SCL}	{0.5, 1, 1.5}	-	9 combinaisons {T, Pr} x 54 chroniques de R ➤ 486 simulations avec connectivité sur 25 ans ➤ 18 simulations sans connectivité sur 25 ans
Parcelle Av	Fève	{C, CL, SCL}	{0.5, 1, 1.5}	-	9 combinaisons {texture, profondeur} x 54 chroniques de R ➤ 486 simulations avec connectivité sur 25 ans ➤ 18 simulations sans connectivité sur 25 ans

2.2.3. Analyse des simulations

Dans ce chapitre, nous analysons les résultats des simulations en deux parties. Nous consacrons la première partie à l'analyse du ruissellement simulé au niveau de la parcelle Am, non connectée, et la deuxième partie à l'analyse des simulations réalisées sur la parcelle Av, recevant l'eau ruisselée de la parcelle Am. L'analyse du ruissellement de la parcelle Am nous permettra (1) d'apporter des éléments explicatifs de quelques résultats observés sur la parcelle Av et (2) de définir les différentes classes du ruissellement amont nécessaire dans l'analyse des simulations de la parcelle Av. L'analyse des simulations sur la parcelle Av a comme objectif principal d'étudier l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures. Ces objectifs sont discutés en détails dans les paragraphes correspondants.

Pour chacune des parcelles Am et Av, les analyses des simulations reposent sur des outils propres. Toutefois, nous utilisons la même méthode pour caractériser l'importance de chaque facteur d'influence dans la variation des variables/indicateurs étudiés, à savoir une analyse de sensibilité basée sur la décomposition de la variance. Cette analyse repose sur un indice de sensibilité (SI pour *sensibility index*) quantifiant la sensibilité de la variable/indicateur étudié aux différents facteurs d'influence considérés. SI est exprimé comme le rapport entre la somme des carrés expliqués par l'effet d'un facteur X sur la somme des carrés totale (Ginot et al., 2006). Cet indice de sensibilité permet donc de hiérarchiser les facteurs d'influences sur la base de leurs importances respectives (poids relatifs).

Analyse du ruissellement de la parcelle Am

Nous nous focalisons dans cette partie sur l'analyse du ruissellement au niveau de la parcelle Am selon deux perspectives.

- Comprendre la variation de la lame d'eau ruisselée de la parcelle amont dans le temps et en fonction des différents facteurs d'influence considérés, à savoir : la culture, le climat, la texture du sol et la profondeur du sol. Nous calculons aussi l'indice de sensibilité afin de connaître l'importance de chaque facteur d'influence précités dans la variation du ruissellement amont.
- Connaître la gamme de variation du ruissellement amont dont bénéficie la parcelle Av, en considérant les différentes tailles de l'aire contributive amont. Cela nous aidera à établir des classes de ruissellement amont, que nous utiliserons dans l'analyse de sensibilité de la parcelle Av, présentée ci-après.

Analyse des simulations de la parcelle Av

Nous consacrons la deuxième partie à l'analyse des simulations de la parcelle Av, recevant de l'eau de la parcelle Am. Cette partie comprend deux étapes.

- La première étape est une analyse de sensibilité avec un double objectif.

Il s'agit d'une part de comprendre la variation des indicateurs de fonctionnement agro-hydrologique et des variables de production agricole étudiés (Tableau 4.3), en fonction de la connectivité inter-parcellaire, du climat, ainsi que de la texture et de la profondeur du sol de la parcelle Av. Pour cela, nous effectuons une analyse de variance à un facteur (ANOVA). Si la probabilité critique (p-value) issue de cette analyse est inférieure à 5%, cela signifie que la variation de l'indicateur de fonctionnement ou de la variable de production agricole étudiée en fonction d'un facteur donné est statistiquement significative.

Il s'agit d'autre part d'étudier le poids relatif que joue chaque facteur dans la variation des indicateurs de fonctionnement agro-hydrologique et des variables de production agricole, en calculant l'indice de sensibilité SI. Cette analyse de sensibilité est basée sur deux indicateurs de fonctionnement hydrologiques, deux variables de production agricole et deux indicateurs de fonctionnement agronomique (Tableau 4.3). Les deux variables de production agricole simulées par AquaCrop sont la biomasse aérienne sèche (AGB pour *aboveground biomass*), le rendement (Yld pour *yield*). Les deux indicateurs du fonctionnement hydrologique sont le coefficient du ruissellement aval (RC) et le coefficient de percolation (DPC) tels que formulés avec les équations 4.3 et 4.4. Analyser les résultats à l'aide de ces deux coefficients nous permet de normaliser les résultats par rapport à la variabilité interannuelle de la pluviométrie. Les deux indicateurs du fonctionnement agronomique sont l'efficacité agronomique de l'eau calculée à partir de la biomasse aérienne sèche (WUE_{AGB}) et celle calculée à partir du rendement (WUE_{Yld}) selon les équations 4.5 et 4.6.

Tableau 4.3 : Récapitulatif des différentes variables et indicateurs d'analyse. RC et DPC désignent le coefficient de ruissellement aval et le coefficient de percolation, respectivement. AGB et Yld désignent la biomasse aérienne sèche et le rendement, respectivement. WUE_{AGB} et WUE_{Yld} désignent l'efficacité agronomique de l'eau calculée à partir de la biomasse aérienne sèche et du rendement, respectivement. Av représente la parcelle aval. Les variables et indicateurs d'analyse sont des grandeurs annuelles.

Variables et indicateurs					
		Nom	Unité	Équations	
Variables de production agricole		AGB	ton/ha	valeur maximale en fin du cycle	
		Yld	ton/ha		
Indicateurs de fonctionnement agro-hydrologique	Indicateurs de fonctionnement hydrologique	RC	-	$RC = \frac{\text{Cumul annuel du ruissellement parcelle Av}}{\text{Cumul annuel de pluie}}$	(4.3)
		DPC	-	$DPC = \frac{\text{Cumul annuel de percolation parcelle Av}}{\text{Cumul annuel de pluie}}$	(4.5)
	Indicateurs de fonctionnement agronomique	WUE _{AGB}	kg/m ³	$WUE_{AGB} = \frac{AGB}{\text{Cumul annuel de pluie}}$	(4.5)
		WUE _{Yld}	kg/m ³	$WUE_{Yld} = \frac{Yld}{\text{Cumul annuel de pluie}}$	(4.6)

- La seconde étape est une étude plus fine de l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures étudiées, à la fois qualitative et quantitative.

L'étude qualitative repose sur une représentation graphique de l'évolution temporelle de AGB pour chacune des deux cultures de la parcelle Av, pour chaque combinaison texture/profondeur du sol, et pour les 25 années de simulation. Cette étape nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur l'évolution de la production agricole sans et avec connectivité.

L'étude quantitative repose sur le calcul des écarts relatifs de AGB et de Yld, entre les simulations avec et sans connectivité, selon l'équation 4.7. Cela nous permet de quantifier l'impact de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des deux cultures considérées (blé et fève), en fonction des conditions environnementales de la parcelle Av (conditions climatiques selon l'indice d'aridité AIF, texture du sol et profondeur du sol). Ces écarts relatifs sont calculés annuellement, pour chaque combinaison de chronique de ruissellement amont (54 chroniques sur 25 années), de texture de sol (3 textures), et de profondeur de sol (3 profondeurs). Nous obtenons ainsi un total de 12 150 écarts relatifs qui sont calculés pour AGB et Yld uniquement. En effet, WUE_{AGB} et WUE_{Yld} sont calculées à partir de la normalisation, par rapport au cumul annuel de pluie, de AGB et de Yld, respectivement. Les écarts relatifs de WUE_{AGB} et WUE_{Yld} sont donc égaux aux écarts relatifs de AGB et Yld.

$$\Delta = \frac{X_{AC} - X_{SC}}{X_{SC}} \quad (4.7)$$

avec :

X_{AC} : valeur de la variable étudiée avec connectivité.

X_{SC} : valeur de la variable étudiée sans connectivité.

$\Delta > 0$ (respectivement < 0) signifie que l'apport de l'eau par connectivité inter-parcellaire a induit une hausse (respectivement une baisse) de la production agricole par rapport au cas sans connectivité.

À ce stade, il est nécessaire de filtrer les simulations AquaCrop pour tenir compte de la réalité terrain. On se base sur le rendement (Yld) qui est une contrainte agro-économique, sachant que le lien avec AGB est complexe, car il fait intervenir l'indice de récolte qui dépend des événements de stress au cours du cycle cultural. En rapport avec les dires d'expert pour le site d'étude, nous sélectionnons les simulations AquaCrop pour lesquelles $Yld(\text{blé}) > 0.5 \text{ ton/ha}$ et $Yld(\text{fève}) > 0.25 \text{ ton/ha}$. Afin de ne pas éliminer les situations de forts

changements, nous filtrons les simulations avec connectivité si $\Delta > 0$ et sans connectivité si $\Delta < 0$. Par suite, il est nécessaire d'analyser les variations de AGB et Yld selon leurs valeurs initiales et finales, avec une attention particulière pour les valeurs faibles (Yld(blé) < 0.5 ton/ha et Yld(fève) < 0.25 ton/ha). En effet, un gain absolu (respectivement une perte de 100%) est plus adéquate lorsque la valeur initiale (respectivement finale) est faible. Le Tableau 4.4. regroupe toutes les situations possibles.

Tableau 4.4 : Tableau explicatif du raisonnement de l'analyse des valeurs des écarts relatifs Δ , calculés entre les variables sans (Yld_{SC}) et avec (Yld_{AC}) connectivité.

$\Delta > 0 \rightarrow \text{Yld}_{AC} > 0.5 \text{ ton/ha}$ pour le blé (0.25 ton/ha pour la fève)	
Si Yld _{SC} < 0.5 ton/ha (0.25 ton/ha pour la fève)	Analyse en gain absolu car Yld _{SC} négligeable
Si Yld _{SC} > 0.5 ton/ha (0.25 ton/ha pour la fève)	Analyse en gain ou perte relatif (% à partir de Δ)
$\Delta < 0 \rightarrow \text{Yld}_{SC} > 0.5 \text{ ton/ha}$ (0.25 ton/ha pour la fève)	
Si Yld _{AC} < 0.5 ton/ha (0.25 ton/ha pour la fève)	Perte de 100%
Si Yld _{AC} > 0.5 ton/ha (0.25 ton/ha pour la fève)	Analyse en gain ou perte relatif (% à partir de Δ)

De plus, il est nécessaire de définir un seuil pour Δ , afin de tenir compte des incertitudes du modèle sur l'estimation des variables d'analyse. Les résultats de l'évaluation d'AquaCrop (chapitre 3) montrent que le modèle simule d'une manière satisfaisante AGB, avec un écart relatif entre biomasse observée et simulée de l'ordre de 11%. De ce fait, nous avons choisi un seuil de 0.11 en valeur absolue pour Δ , à partir duquel nous pouvons considérer que l'effet de la connectivité est significatif. Le modèle n'ayant pas été évalué sur le rendement dans la zone d'étude, nous prenons le même seuil pour AGB et Yld.

Une fois que toutes les étapes décrit ci-dessus soient réalisées, nous analysons les Δ obtenus en représentant, à l'aide de tableaux, la répartition des occurrences totales des $\Delta > 0.11$ (respectivement < -0.11) en fonction des facteurs d'influences caractérisés par leurs classes respectives.

Enfin, il est important de noter que dans l'analyse de sensibilité, nous traduisons l'effet du climat par l'indice d'aridité AIF, ainsi que l'effet de la connectivité inter-parcellaire par les

classes de ruissellement amont (voir paragraphe “analyse du ruissellement de la parcelle Am” dans la présente section). Nous précisons que ces classes de ruissellement seront présentées dans la première section de la partie résultat, et ensuite utilisées pour analyser l’impact des connectivités inter-parcellaires. Nous rappelons aussi que nous travaillons sur des années hydrologiques, allant de septembre année [n-1] à août année [n], pour une année n donnée.

3. Résultats

3.1. Analyse du ruissellement amont

Nous analysons, dans la sous-section 3.1.1 et 3.1.2, le flux du ruissellement amont à la sortie de la parcelle Am (sans considérer la taille de l’aire contributive amont) afin de (1) comprendre la dynamique de la variation de ce ruissellement en fonction du temps, et (2) d’identifier les principaux facteurs d’influence contrôlant cette variable. Nous analysons ensuite, dans la sous-section 3.1.3 le cumul de ruissellement amont en considérant les différentes tailles de l’aire contributive amont. Ceci nous permet de connaître la gamme de variation de la lame d’eau dont bénéficie la parcelle Av, et d’établir des classes de ruissellement amont qui sont nécessaires dans l’analyse de sensibilité des simulations au niveau de la parcelle Av (section 3.2).

3.1.1. Variation en fonction du temps

La Figure 4.7 représente la variation du cumul de ruissellement mensuel, simulé au niveau de la parcelle Am pour toutes les combinaisons de culture/texture/profondeur du sol, et ce sur 25 années. Les statistiques indiquent que le flux moyen du ruissellement simulé au niveau de la parcelle Am varie de 0 mm à 176 mm. Nous observons aussi que le ruissellement a lieu principalement entre le mois d’octobre et le mois de mars, soit durant les cycles cultureux des différentes cultures présentes au sein de Kamech. Cela implique que les quantités d’eau ruisselées de l’amont pendant cette période et ré-infiltrées en aval peuvent servir à la recharge du sol, soit avant le semis si le ruissellement a lieu entre octobre et novembre, soit durant le cycle cultural si le ruissellement a lieu plus tard dans la saison.

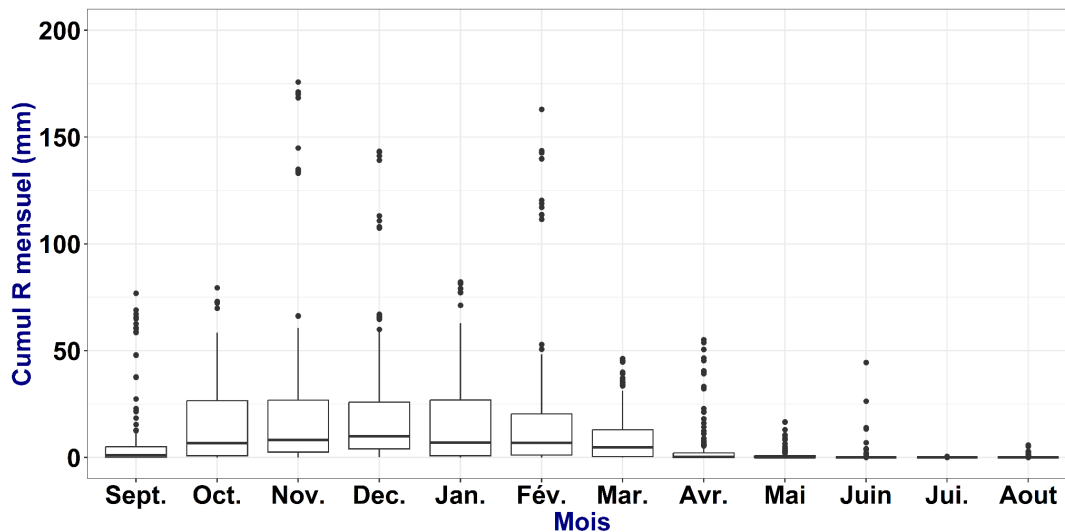


Figure 4.7 : Variation du cumul de ruissellement mensuel simulé (R) au niveau de la parcelle Am, pour toutes les combinaisons de culture/texture/profondeur du sol, sur 25 années.

3.1.2. Analyse de sensibilité

La Figure 4.8 représente la variation de la moyenne du ruissellement annuel simulé sur 25 années, au niveau de la parcelle Am, en fonction du climat, de la texture du sol et de la profondeur du sol, et ce pour le blé et la fève. De cette figure, nous déduisons les points suivants.

- Le ruissellement dépend de la culture, avec des lames ruisselées plus importantes pour la fève que pour le blé, quelles que soient les conditions de climat, de texture du sol et de profondeur du sol.
- Nous observons une variation importante du ruissellement en fonction des conditions climatiques, avec (1) des lames ruisselées plus importantes en années subhumides, caractérisées par une pluviométrie annuelle nettement supérieure à la moyenne (Figure 4.2 et 4.4), et (2) des lames ruisselées plus faibles en années semi-arides, caractérisées par une pluviométrie annuelle bien faibles. Globalement, le ruissellement annuel moyen (moyenne entre les deux cultures) varie entre 240 mm en années subhumides et 73 mm en années semi-arides.
- La variation du ruissellement en fonction de la texture du sol est plus faible, avec des lames ruisselées légèrement plus importantes sur C que sur CL et SCL. Le ruissellement annuel moyen (moyenne entre les deux cultures) est égal à 118 mm pour C, 106 mm pour CL et 108 mm pour SCL, soit une variation relative de 11%.
- La variation du ruissellement avec la profondeur du sol est presque nulle, avec un ruissellement annuel moyen (moyenne entre les deux cultures) égal à 111 mm pour des sols

de 0.5 m de profondeur et 110 mm pour des sols de 1 m et 1.5 m de profondeurs, soit une variation relative de 0.9%.

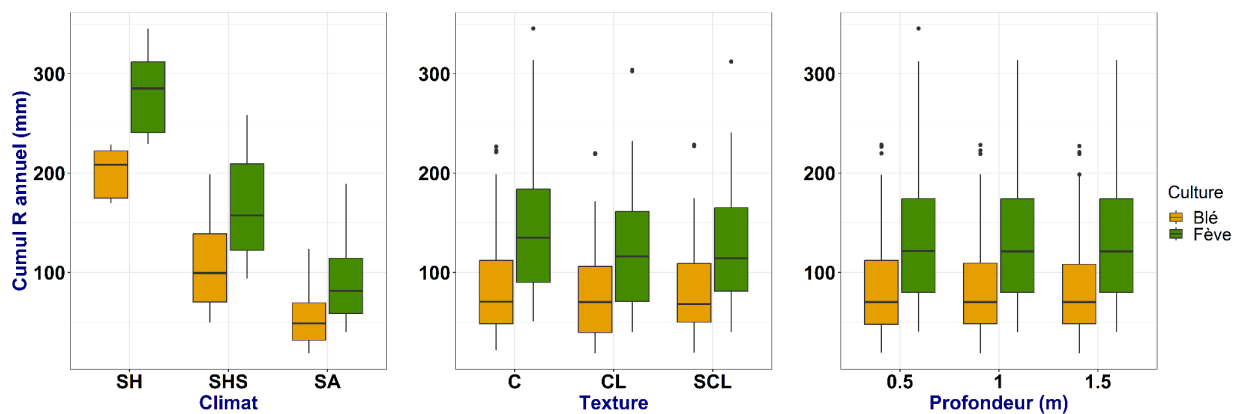


Figure 4.8 : Ruissellement annuel (R), simulé au niveau de la parcelle Am, sur 25 années, en fonction du climat, de la texture et de la profondeur du sol, et ce pour le blé (boxplots jaunes) et pour la fève (boxplots verts). SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF (Section 2.1). C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.

Pour connaître le poids relatif, dans la variation du ruissellement de la parcelle Am, de chacun des facteurs d'influence évoqués ci-dessus, nous représentons par la Figure 4.9 les indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA (décomposition de la variance). Cette figure montre que les conditions climatiques expliquent plus que $\frac{3}{4}$ de la variation du ruissellement avec un SI égal à 0.78, qui correspond à un poids relatif de 78%. La culture est le deuxième facteur d'influence le plus important dans la variation du ruissellement avec un SI égal à 0.21. La texture et la profondeur du sol sont les facteurs d'influence les moins importants par rapport à la culture et aux conditions climatiques avec des SI de 0.01 et 0, respectivement.

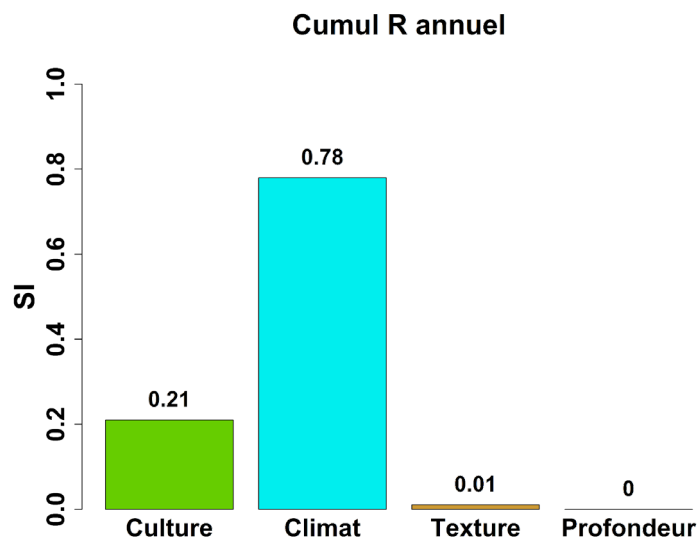


Figure 4.9 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour le cumul annuel de ruissellement (R), simulé au niveau de la parcelle Am, sur 25 années.

3.1.3. Classification du ruissellement amont

Pour connaître la gamme de variation du ruissellement amont dont bénéficie la parcelle Av, il faut multiplier les 54 chroniques de ruissellement $R(t)$ simulés au niveau de la parcelle Am par les 3 valeurs du rapport α (0.5, 1, 2) qui représente le ratio entre l’aire contributive amont et l’aire de la parcelle Av (Figure 4.5 et 4.6). Ceci nous permet ensuite d’établir une classification du ruissellement amont, nécessaire dans l’analyse de sensibilité des simulations réalisées au niveau de la parcelle Av.

Tableau 4.5 : Statistique de variation du cumul annuel du ruissellement amont (R) en considérant les différentes tailles de l’aire contributive amont. Q1, Q2 et Q3 représentent les valeurs pour le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile, respectivement. Nous indiquons aussi la moyenne du ruissellement annuel amont (cases grisées). Pour chaque valeur de ruissellement, nous indiquons le coefficient du ruissellement (RC) correspondant (rapport ruissellement / précipitation pour l’échantillon concerné), sauf pour la moyenne qui est le ratio ruissellement moyen sur les 162 échantillons / précipitation moyenne sur toute la période d’étude.

	Min	Q1	Q2	Moyenne	Q3	Max
R	9 mm	51 mm	95 mm	129 mm	170 mm	691 mm
RC	2%	10%	17%	21%	27%	67%

Le Tableau 4.5 présente les statistiques de variation du cumul du ruissellement annuel amont, sur 25 années, en considérant les différentes tailles de l’aire contributive amont. Ce tableau montre que sur les 25 années d’étude, la parcelle Av bénéficie annuellement d’une lame d’eau amont qui

varie entre 9 mm 691 mm, selon les conditions ruisselantes amont (année climatique, texture, profondeur, culture, aire contributive amont). Un ruissellement de 51 mm présente une contribution de 10% (coefficient de ruissellement) par rapport à la contribution des pluies tandis qu'un ruissellement de 170 mm présente une contribution de 27% par rapport à celles des pluies. Pour faciliter l'analyse de sensibilité des simulations réalisées au niveau de la parcelle Av, recevant de l'eau de la parcelle Am, par connectivité inter-parcellaire, nous classons le ruissellement amont en quatre classes, en se basant sur les statistiques données dans le Tableau 4.4. Le Tableau 4.6 résume les différentes classes considérées.

Tableau 4.6 : Classification du ruissellement amont. C1, C2, C3, et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement du ruissellement amont. Q1, Q2 et Q3 correspondent au 1er quartile, à la médiane et au 3ème quartile, respectivement.

Classe de ruissellement amont	Intervalle de variation du cumul du ruissellement annuel amont
Classe 1 (C1)	Cumul R annuel < Q1
Classe 2 (C2)	$Q1 \leq \text{Cumul R annuel} < Q2$
Classe 3 (C3)	$Q2 \leq \text{Cumul R annuel} < Q3$
Classe 4 (C4)	Cumul R annuel $\geq Q3$

3.2. Analyse des simulations de la parcelle aval (Av)

Pour analyser les simulations réalisées au niveau de la parcelle Av, nous commençons par une analyse de sensibilité avec un double objectif. Tout d'abord, nous déterminons si la variation des indicateurs et variables étudiés en fonction des différents facteurs d'influence considérés est statistiquement significative. Ensuite, nous estimons le poids relatif de chaque facteur d'influence dans la variation des indicateurs et variables étudiés. Nous passons ensuite à une étude plus fine de l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures étudiées, en réalisant une analyse qualitative et quantitative des simulations sans et avec connectivité.

Pour rappel, l'analyse de sensibilité des résultats des simulations réalisées au niveau de la parcelle Av est basée sur deux indicateurs de fonctionnement hydrologique (RC et DPC), deux variables de production agricole (AGB et Yld) et deux indicateurs de fonctionnement agronomique (WUE_{AGB} et WUE_{Yld}). Les facteurs d'influence considérés pour la parcelle Av sont les conditions climatiques traduites par l'indice d'aridité AIF, la texture du sol, la profondeur du sol et la connectivité inter-parcellaire, traduite par les classes du ruissellement amont.

3.2.1. Analyse de sensibilité

3.2.1.1. Indicateurs de fonctionnement hydrologique

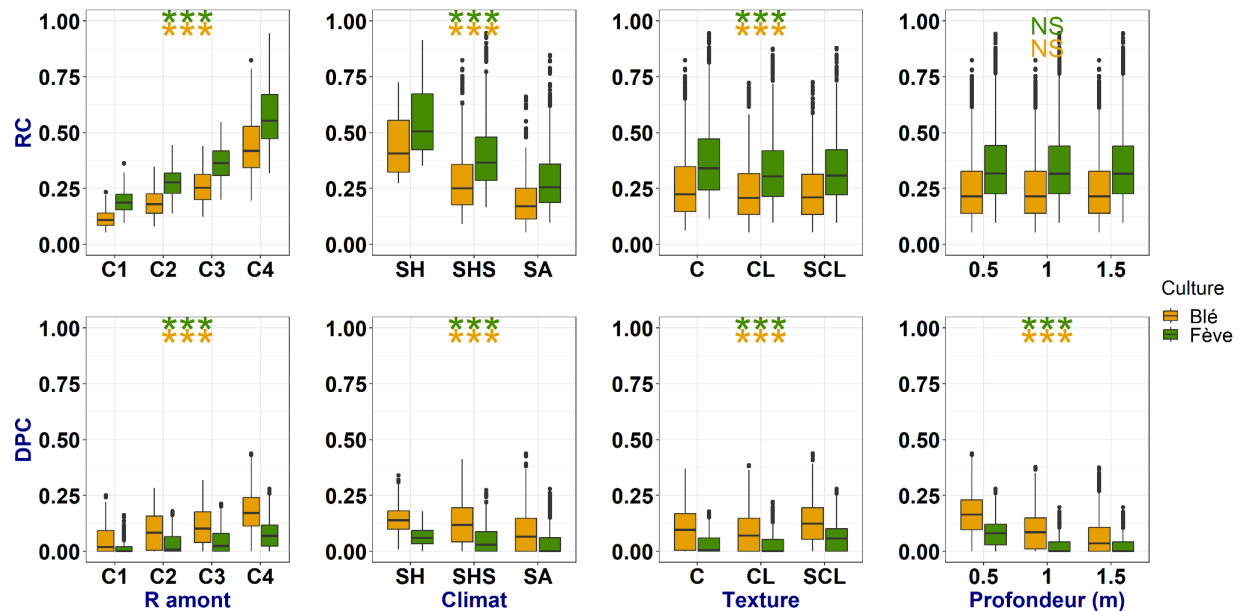


Figure 4.10 : Coefficient de ruissellement annuel (RC, 1ère ligne) et coefficient de percolation annuel (DPC, 2ème ligne) pour la parcelle Av, pour le blé (jaune) et la fève (vert), en fonction des quatre facteurs considérés. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4 du ruissellement amont, respectivement. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les étoiles correspondent à la significativité du p-value issue d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Signification des codes : "****" : p-value $\in [0 - 0.001[$, "***" : p-value $\in [0.001 - 0.01[$, "**" : p-value $\in [0.01 - 0.05[$, "*" : p-value $\in [0.05 - 0.1[$, "NS" : p-value $\in [0.1 - 1]$.

La Figure 4.10 représente les variations de RC et DPC en fonction des facteurs d'influence considérés. De cette figure, nous déduisons les points suivants.

- La fève est caractérisée d'une manière générale par un ruissellement plus important et une percolation plus faible que le blé, similairement à ce que nous avons observé pour la parcelle Am.
- RC et DPC évoluent de la même manière en fonction des différentes classes de ruissellement amont, de climat, de texture du sol et de profondeur du sol.
- RC et DPC augmentent en fonction de la classe du ruissellement amont. L'augmentation est plus importante pour RC que pour DPC en absolu, et similaire en relatif. En effet, les moyennes de RC varient en fonction de la classe du ruissellement amont de 0.19 à 0.58 (0.39

en absolu, 101% en relatif) pour la fève et de 0.12 à 0.44 (0.32 en absolu, 144% en relatif) pour le blé. Quant aux moyennes de DPC, elles varient de 0.02 à 0.08 (0.06 en absolu, 120% en relatif) pour la fève et de 0.05 à 0.18 (0.13 en absolu, 113% en relatif) pour le blé.

- RC et DPC dépendent des conditions climatiques avec des valeurs importantes en années subhumides (SH) et des valeurs faibles en années semi-arides (SA). Les moyennes de RC varient de 0.29 à 0.55 pour la fève et de 0.20 à 0.44 pour le blé. Quant aux moyennes de DPC, elles varient de 0.03 à 0.06 pour la fève et de 0.09 à 0.14 pour le blé. Les valeurs sont globalement multipliées par deux en passant de SA à SH.
- Comme pour la parcelle Am, RC varie modérément en fonction de la texture avec des valeurs légèrement plus élevées sur la texture C. Les moyennes de RC en fonction de la texture du sol varient entre 0.34 et 0.38 (10% en relatif) pour la fève et entre 0.24 et 0.28 (15% en relatif) pour le blé. La variation de RC en fonction de la profondeur du sol est négligeable, avec une moyenne de l'ordre de 0.35 pour la fève et de 0.25 pour le blé, et ce quel que soit la classe de profondeur. Contrairement à RC, la variation de DPC en fonction de la texture et de la profondeur du sol est bien plus marquée, avec des valeurs plus faibles sur la texture CL comparé à la texture C et SCL, et une diminution de DPC lorsque la profondeur augmente. Les moyennes de DPC varient en fonction de la texture du sol de 0.03 à 0.06 (0.03 en absolu, 66% en relatif) pour la fève et de 0.09 à 0.13 (0.04 en absolu, 36% en relatif) pour le blé. En fonction de la profondeur du sol, les moyennes de DPC varient de 0.02 à 0.08 (0.06 en absolu, 120% en relatif) pour la fève et de 0.06 à 0.17 (0.11 en absolu, 96% en relatif) pour le blé.
- Les résultats d'analyse statistique sont identiques pour les deux indicateurs RC et DPC, et pour les deux cultures, fève et blé. L'analyse ANOVA monofactorielle confirme que la variation de RC en fonction de la classe du ruissellement amont et des conditions climatiques est significative, avec des p-values < 5%. Bien que la variation de RC en fonction de la texture du sol soit faible, l'analyse ANOVA indique que cette variation est statistiquement significative, avec des p-values < 5%. L'analyse ANOVA confirme aussi que la variation de RC ne dépend pas de la profondeur du sol, avec des p-value > 10%. Pour DPC, les résultats d'ANOVA indiquent une variation significative de cette variable, en fonction des 4 facteurs considérés, avec des p-values < 5%.

Pour connaître le poids relatif de chaque facteur d'influence dans la variation des deux indicateurs de fonctionnement hydrologique, RC et DPC, nous représentons dans la Figure 4.11, l'indice de

sensibilité (SI) correspondant à chaque facteur. Cette figure illustre les points suivants. Pour rappel, RC et DPC sont le ruissellement et la percolation normalisés par la pluie.

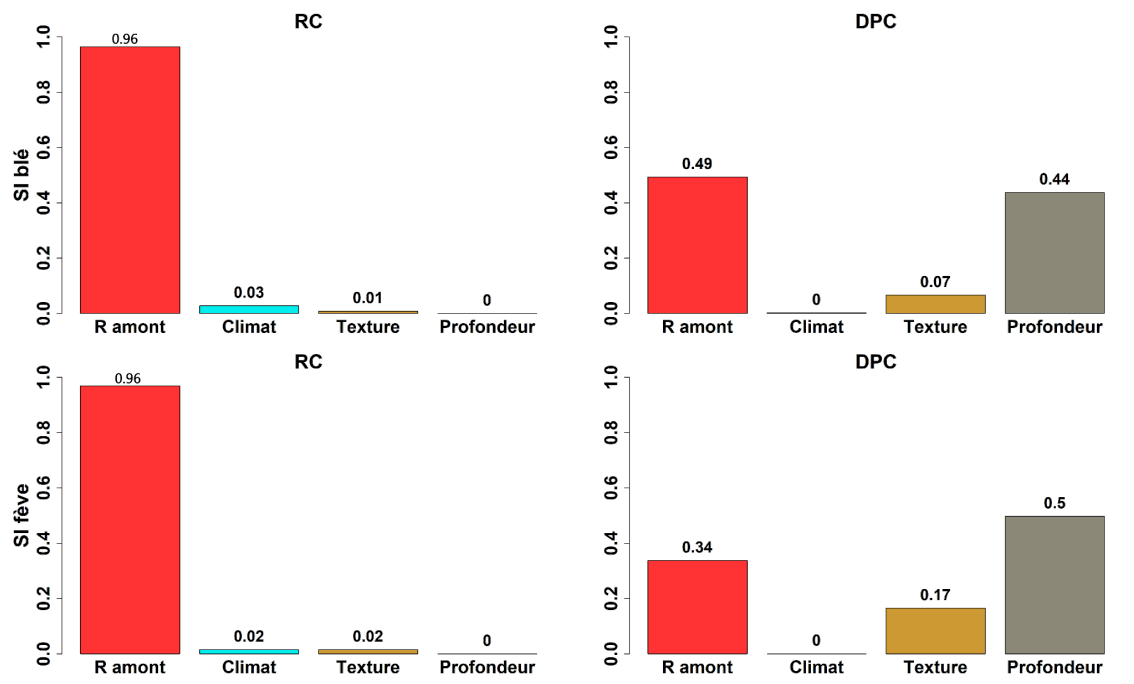


Figure 4.11 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour le coefficient de ruissellement (RC, colonne de gauche) et le coefficient de percolation (DPC, colonne de droite), et ce pour les deux cultures blé (ligne du haut) et fève (ligne du bas). R amont représente le ruissellement amont.

- Pour les deux cultures, la variation de RC est principalement expliquée par le ruissellement reçu de l’amont, avec un SI égale à 0.96. Pour cet indicateur, les SI relatifs à la texture du sol sont très faibles, ne dépassant pas 0.03. La profondeur du sol n’a aucun effet sur la variation de RC avec des indices de sensibilité nuls pour les deux cultures. Enfin, les SI relatifs aux conditions climatiques sont très faibles, ce qui s'explique par le fait que RC implique une normalisation par la pluie.
- Pour les deux cultures, la variation de DPC est principalement expliquée par le ruissellement amont et la profondeur du sol. Cependant, l’ordre d’importance de ces deux facteurs est inversé entre le blé et la fève. Pour le blé, c’est le ruissellement amont qui présente le poids relatif le plus important dans la variation de DPC avec un SI égale à 0.49 tandis que le SI relatif à la profondeur du sol est de 0.44. Pour la fève, l’ordre d’importance est inversé avec SI de 0.34 pour le ruissellement amont et de 0.50 pour la profondeur du sol. L’effet de la texture du sol dans la variation de DPC est plus important sur la fève que sur le blé, avec des SI de 0.17 et 0.07, respectivement. L’effet des conditions climatiques dans la variation de

DPC est négligeable, par rapport aux autres facteurs d'influence, ce qui s'explique par le fait que DPC implique une normalisation par la pluie.

3.2.1.2. Variables de production agricole

La Figure 4.12 représente les variations de AGB et de Yld en fonction des facteurs d'influence considérés. De cette figure, nous déduisons les points suivants.

- La production agricole est plus importante pour le blé que pour la fève, ce qui est couramment rapporté lorsque l'on compare les rendements des céréales et légumineuses.
- Pour les deux cultures, les deux variables de production agricole augmentent en fonction de la classe de ruissellement amont avec une variation légèrement plus importante pour le Yld. Les moyennes de AGB varient en fonction de la classe du ruissellement amont de 3 ton/ha à 6 ton/ha (3 ton/ha en absolu, 66% en relatif) pour la fève et de 5 ton/ha à 7 ton/ha (2 ton/ha en absolu, 33% en relatif) pour le blé. Quant aux moyennes de Yld, elles varient de 0.8 ton/ha à 1.5 ton/ha (0.7 ton/ha en absolu, en 61% en relatif) pour la fève et de 1.5 ton/ha à 2.4 ton/ha (0.9 ton/ha en absolu, 46% en relatif) pour le blé.
- Pour les deux cultures, la variation de AGB et de Yld en fonction des conditions climatiques est importante avec une production plus élevée en années subhumides qu'en années subhumides sèches et semi-arides. Les moyennes de AGB varient en fonction des conditions climatiques de 3.5 ton/ha à 7.2 ton/ha (3.7 ton/ha en absolu, 69% en relatif) pour la fève et de 5 ton/ha à 8 ton/ha (3 ton/ha en absolu, 46% en relatif) pour le blé. Quant aux moyennes de Yld, elles varient de 0.8 ton/ha à 2 ton/ha (1.2 ton/ha en absolu, 86% en relatif) pour la fève et de 1.4 ton/ha à 3 ton/ha (1.6 ton/ha en absolu, 73% en relatif) pour le blé.
- La texture et la profondeur du sol influencent aussi considérablement la production agricole des deux cultures. D'une part, cette production est plus importante sur la texture CL et plus faible sur la texture C. D'autre part, elle augmente avec la profondeur du sol, sauf pour la fève où aucune différence n'est observée entre les profondeurs 1 m et 1.5 m, probablement due à la profondeur racinaire maximale de cette culture, qui est de 1 m. En fonction de la texture du sol, les moyennes de AGB varient entre 3 ton/ha et 5.5 ton/ha (2.5 ton/ha en absolu, 59% en relatif) pour la fève, et entre 4.3 ton/ha et 7.3 ton/ha (3 ton/ha en absolu, 52% en relatif) pour le blé. Quant aux moyennes de Yld, elles varient entre 0.7 ton/ha et 1.4 ton/ha (0.7 ton/ha en absolu, 67% en relatif) pour la fève, et entre 1.3 ton/ha et 2.5 ton/ha (1.2 ton/ha en absolu, 63% en relatif) pour le blé. En fonction de la profondeur du sol, les moyennes de AGB varient entre 3.8 ton/ha et 5 ton/ha (1.2 ton/ha en absolu, 27% en relatif) pour la fève, et entre 5 ton/ha et 7 ton/ha (2 ton/ha en absolu, 33% en relatif) pour le blé. Quant aux

moyennes de Yld, elles varient entre 0.7 ton/ha et 1.3 ton/ha (0.6 ton/ha en absolu, 60% en relatif) pour la fève, et entre 1.1 ton/ha et 2.6 ton/ha (1.5 ton/ha en absolu, 81% en relatif) pour le blé.

- Similairement à ce que nous avons observé pour RC et DPC, les résultats d'analyse statistique sont identiques entre les deux cultures. L'analyse ANOVA à un facteur confirme que la variation de AGB et de Yld en fonction des différents facteurs d'influence considérés est significative, avec des p-values < 5%.

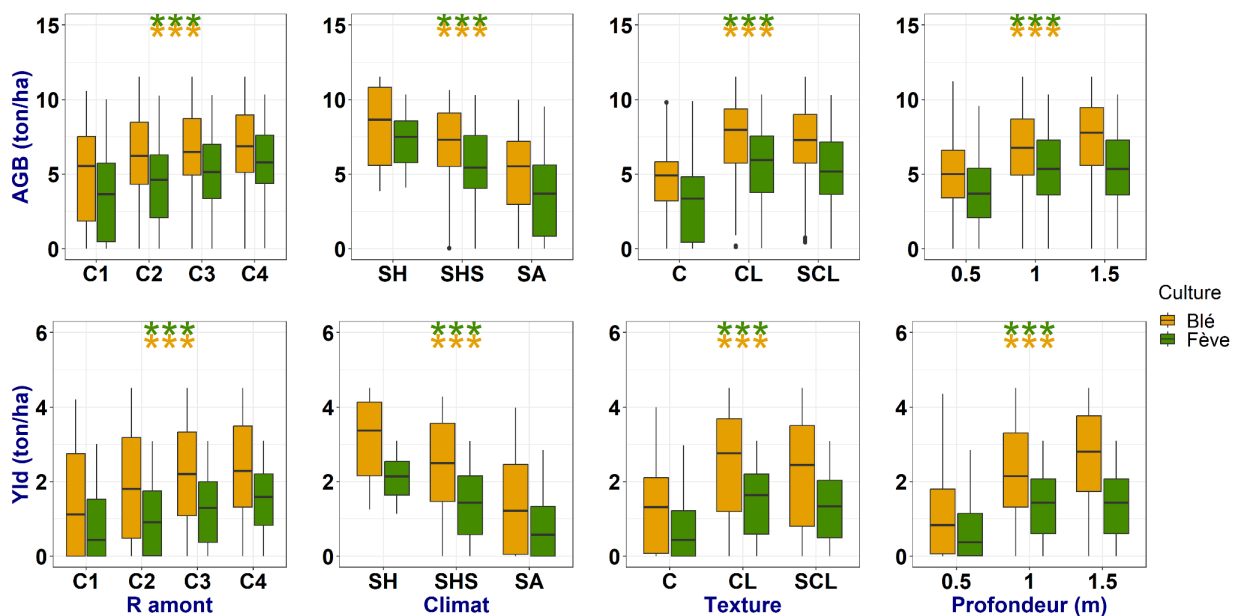


Figure 4.12 : Biomasse aérienne sèche annuelle (AGB, 1ère ligne) et rendement annuel (Yld, 2ème ligne) de la parcelle Av, pour le blé (jaune) et la fève (vert), en fonction des quatre facteurs considérés. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement du ruissellement amont. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les étoiles correspondent à la significativité du p-value issue d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Signification des codes : "****" : p-value $\in [0 - 0.001[$, "***" : p-value $\in [0.001 - 0.01[$, "**" : p-value $\in [0.01 - 0.05[$, "." : p-value $\in [0.05 - 0.1[$, "NS" : p-value $\in [0.1 - 1]$.

Pour connaître le poids relatif de chaque facteur d'influence dans la variation des deux variables de production agricole, AGB et Yld, nous représentons dans la Figure 4.13, le SI correspondant à chaque facteur.

Pour les deux cultures, la variation de AGB est principalement expliquée par la texture du sol avec des SI de 0.47 et de 0.36 pour le blé et la fève, respectivement. Pour le blé, les conditions

climatiques sont le deuxième facteur expliquant la variation de AGB, suivies par la profondeur du sol et le ruissellement amont, avec des SI de 0.21, 0.18 et 0.13, respectivement. Pour la fève, le ruissellement amont et les conditions climatiques présentent le même poids relatif dans la variation de AGB avec des SI de 0.27 et 0.26, respectivement, et la profondeur du sol a moins d'impact, avec un SI de 0.12.

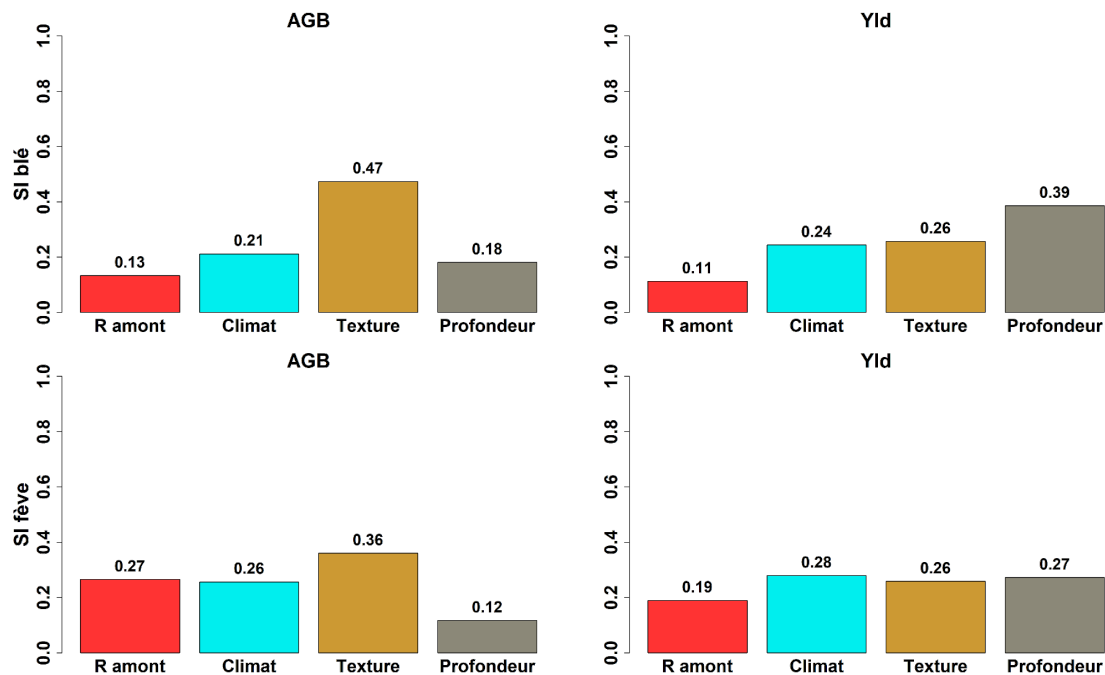


Figure 4.13 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour la biomasse aérienne sèche (AGB, colonne de gauche) et le rendement (Yld, colonne de droite), et ce pour le blé (première ligne) et la fève (deuxième ligne). R amont représente le ruissellement amont.

L'ordre d'importance des différents facteurs d'influence pour Yld est différent de celui de AGB. Pour le blé, la variation de Yld est principalement expliquée par la profondeur du sol avec un SI de 0.39, suivi de la texture du sol et des conditions climatiques, présentant le même poids relatif dans la variation de Yld avec des SI de 0.26 et 0.24, respectivement. Pour cette culture, le ruissellement amont a moins d'impact sur le Yld, avec un SI de 0.11. Pour la fève, les conditions climatiques, la texture et la profondeur du sol présentent le même poids relatif dans la variation de Yld avec des SI de 0.28, 0.26 et 0.27, respectivement. Pour cette culture, le ruissellement présente un SI de 0.19.

3.2.1.3. Indicateurs de fonctionnement agronomique

La Figure 4.14 représente les variations de WUE_{AGB} et WUE_{Yld} en fonction des facteurs d'influence considérés. De cette figure, nous déduisons les points suivants.

- L'efficacité agronomique de l'eau est plus importante pour le blé que pour la fève. Cela découle du fait que la production agricole est plus importante pour le blé que pour la fève.
- Pour le blé, la variation de WUE_{AGB} en fonction des classes du ruissellement amont est faible, avec des moyennes variant entre 0.95 kg/m^3 et 1 kg/m^3 (0.05 kg/m^3 en relatif, 5% en absolu). Pour la fève, nous observons une augmentation importante de WUE_{AGB} entre C1 et C2, tandis que les variations entre C2, C3 et C4 sont faibles. Pour cette culture, les moyennes de WUE_{AGB} entre les différentes classes du ruissellement amont varient de 0.6 kg/m^3 à 0.8 kg/m^3 (0.2 kg/m^3 en absolu, 29% en relatif). La variation de WUE_{Yld} en fonction des classes de ruissellement amont est plus importante que celle de WUE_{AGB} , et ce pour les deux cultures. Les moyennes de WUE_{Yld} varient en fonction de la classe du ruissellement amont de 0.13 kg/m^3 à 0.2 kg/m^3 (0.07 kg/m^3 en absolu, 42% en relatif) pour la fève, et de 0.26 kg/m^3 à 0.33 kg/m^3 (0.07 kg/m^3 en absolu, 24% en relatif) pour le blé.
- Pour les deux cultures, les indicateurs de fonctionnement agronomique varient en fonction des conditions climatiques avec les tendances suivantes : (1) des WUE_{AGB} plus faibles en années SH pour le blé, (2) des WUE_{AGB} plus faibles en années SA pour la fève, (3) des WUE_{Yld} plus importantes en années SH et SHS qu'en années SA pour les deux cultures, et (3) une sensibilité plus grande de WUE_{Yld} (variation relative de 30% pour le blé et 44% pour la fève) par rapport à WUE_{AGB} (variation relative de 15% pour le blé et 22% pour la fève) .
- Comme pour AGB et Yld, la texture et la profondeur du sol influencent considérablement l'efficacité agronomique de l'eau. Cette dernière est plus importante sur la texture CL et plus faible sur la texture C, quel que soit la culture et le WUE, et elle augmente avec la profondeur du sol. Cependant, pour la fève, aucune différence n'est observée entre les profondeurs 1 m et 1.5 m, ce qui s'explique par la profondeur racinaire de la fève (1 m). En fonction de la texture du sol, les moyennes de WUE_{AGB} varient entre 0.5 kg/m^3 et 0.9 kg/m^3 (0.4 kg/m^3 en absolu, 57% en relatif) pour la fève et entre 0.7 kg/m^3 et 1.2 kg/m^3 (0.5 kg/m^3 en absolu, 53% en relatif) pour le blé, tandis que les moyennes de WUE_{Yld} varient entre 0.1 kg/m^3 et 0.2 kg/m^3 (0.1 kg/m^3 en absolu, en 67% relatif) pour la fève et entre 0.2 kg/m^3 et 0.4 kg/m^3 (0.2 kg/m^3 en absolu, 67% en relatif) pour le blé. En fonction de la profondeur du sol, les moyennes de WUE_{AGB} varient entre 0.6 kg/m^3 et 0.8 kg/m^3 (0.2 kg/m^3 en absolu, 29% en relatif) pour la fève et entre 0.8 kg/m^3 et 1.1 kg/m^3 (0.3 kg/m^3 en absolu, 0.32 % en relatif) pour le blé, tandis que les moyennes de WUE_{Yld} varient entre 0.1 kg/m^3 et 0.2 kg/m^3 (0.1 kg/m^3 en absolu, en 67% relatif) pour la fève et entre 0.16 kg/m^3 et 0.4 kg/m^3 (0.24 kg/m^3 en absolu, en 86% relatif) pour le blé.

- Malgré les faibles variations de WUE_{AGB} et WUE_{Yld} selon le ruissellement amont et des conditions climatiques, en comparaison aux variations de WUE_{AGB} et WUE_{Yld} selon la texture et la profondeur, les résultats des analyses statistiques montrent que ces variations sont significatives, avec des p-values < 5%. L'analyse ANOVA confirme aussi que les variations de WUE_{AGB} et WUE_{Yld} en fonction de la texture et de la profondeur du sol sont aussi significatives, avec des p-values < 5%.

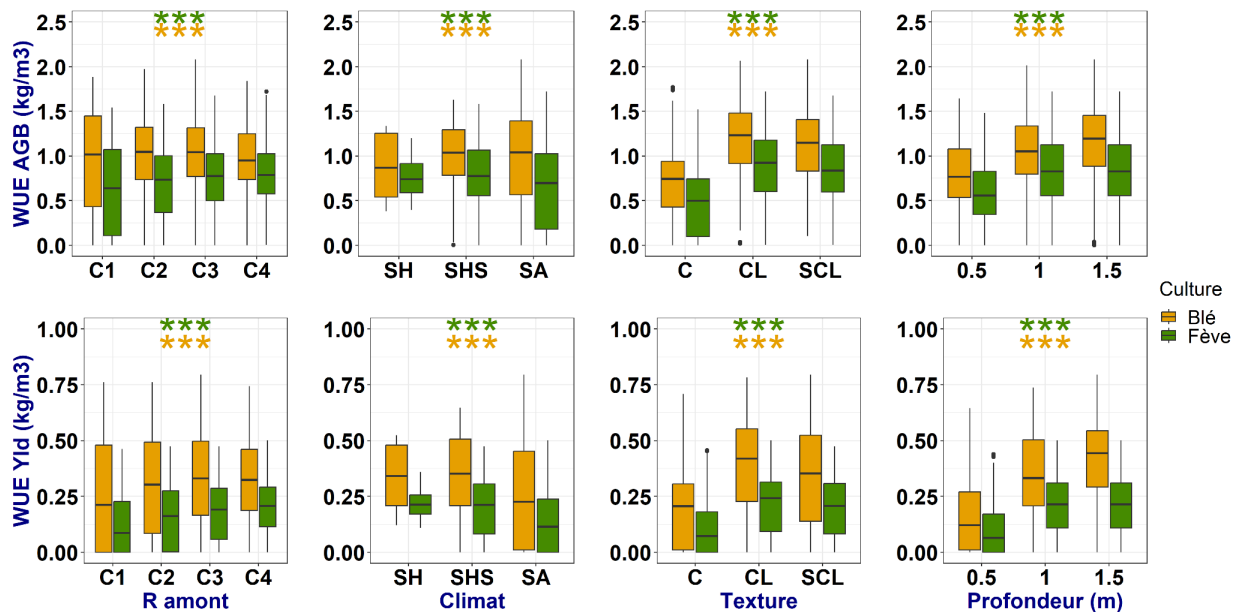


Figure 4.14 : Valeur annuelle de l'efficacité agronomique de l'eau, calculée à partir de la biomasse (WUE_{AGB} , 1ère ligne) et du rendement (WUE_{Yld} , 2ème ligne) pour la parcelle Av, pour le blé (jaune) et la fève (vert), en fonction des quatre facteurs considérés. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement du ruissellement amont. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement, issues de la classification des années climatiques, selon l'indice AIF. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les étoiles correspondent à la significativité du p-value issue d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Signification des codes : "****" : p-value $\in [0 - 0.001]$, "***" : p-value $\in [0.001 - 0.01]$, "**" : p-value $\in [0.01 - 0.05]$, "*" : p-value $\in [0.05 - 0.1]$, "NS" : p-value $\in [0.1 - 1]$.

Pour connaître le poids relatif de chaque facteur d'influence dans les variations des deux indicateurs de fonctionnement agronomique, WUE_{AGB} et WUE_{Yld} , nous représentons dans la Figure 4.15, les SI relatifs à chaque facteur.

Pour les deux cultures, la variation de WUE_{AGB} est principalement expliquée par la texture du sol, avec un SI de 0.7 pour le blé et de 0.64 pour la fève, suivie de la profondeur du sol, avec des SI de 0.27 et 0.19, pour le blé et la fève, respectivement. Pour le blé, les SI des conditions

climatiques et du ruissellement amont sont très faibles, ne dépassant pas 0.02. Pour la fève, le poids relatif que joue le ruissellement amont dans la variation de WUE_{AGB} est plus important que pour le blé avec un SI de 0.12, tandis que l'effet des conditions climatiques est faible comme pour le blé, avec un SI de 0.04.

Pour les deux cultures, la variation de WUE_{Yld} est principalement expliquée par la profondeur du sol avec des SI de 0.55 pour le blé et de 0.42 pour la fève, suivie de la texture du sol avec des SI de 0.35 et de 0.37 pour le blé et pour la fève, respectivement. Pour WUE_{Yld} , les poids relatifs que jouent le ruissellement amont et les conditions climatiques dans la variation de WUE_{Yld} sont plus importants comparé à ceux de WUE_{AGB} , avec des SI entre 0.04 et 0.06 pour le blé, et des SI entre 0.10 et 0.11 pour la fève.

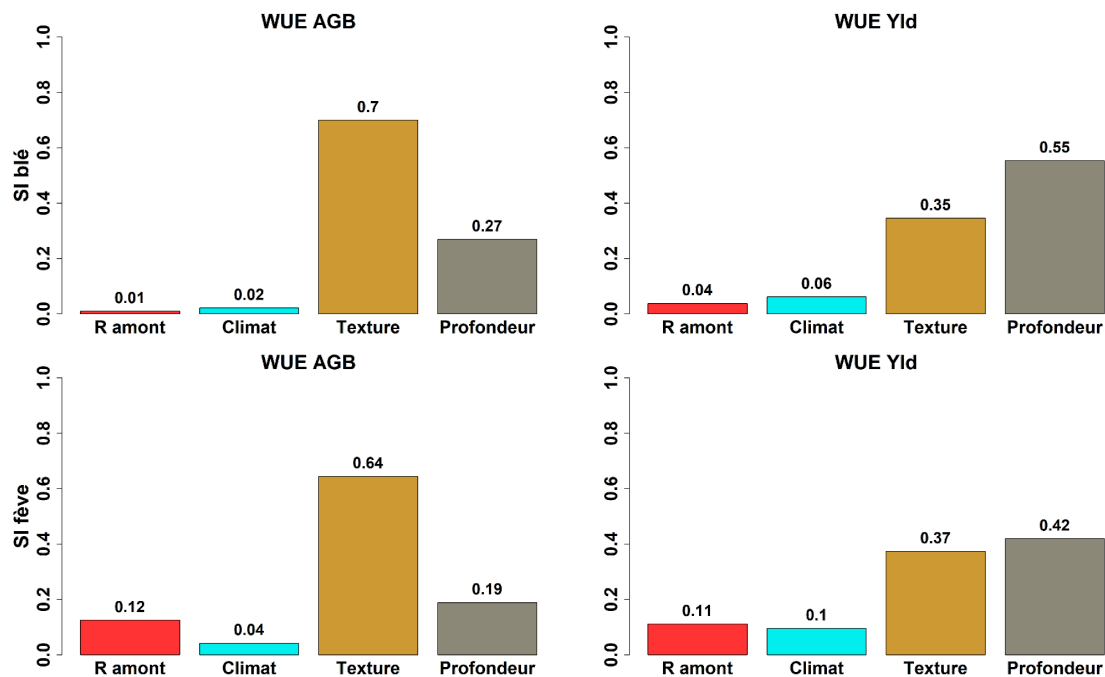


Figure 4.15 : Indices de sensibilité (SI) calculés à partir de la table ANOVA pour l'efficacité agronomique de l'eau calculée à partir de la biomasse aérienne sèche (WUE_{AGB} , colonne de gauche) et à partir du rendement (WUE_{Yld} , colonne de droite), et ce pour les deux cultures blé (ligne du haut) et fève (ligne du bas). R amont représente le ruissellement amont.

3.2.2. Effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures

Afin d'étudier plus finement l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des deux cultures étudiées au niveau de la parcelle Av, nous représentons, via les Figures 4.16 et 4.17, l'évolution temporelle de AGB pour le blé et la fève, sans et avec connectivité, sur 25

années de simulations, et ce pour chaque combinaison de texture et de profondeur de sol. Étant donné que Yld est calculé à partir de AGB, nous présentons ici uniquement AGB, et les figures équivalentes pour Yld sont présentées dans l'annexe B, Figures B.2 et B.3. Dans ces deux figures, pour chaque année et chaque combinaison de texture/profondeur de sol, 55 courbes se superposent, une courbe en rouge, correspondant à la simulation sans connectivité, et 54 courbes en noir, correspondant aux simulations avec connectivité. Pour une année donnée et une combinaison donnée de texture/profondeur du sol de la parcelle Av, les 54 simulations avec connectivité correspondent aux différentes chroniques du ruissellement amont (voir Tableau 4.2 et Figure 4.6).

Les Figures 4.16 et 4.17 montrent que d'une manière générale, la connectivité inter-parcellaire améliore faiblement la production de biomasse (AGB) pour les deux cultures. Pour ces deux cultures, il existe des cas d'amélioration de AGB avec la prise en compte de la connectivité inter-parcellaire, comme par exemple le blé semé en 2004 sur un sol argileux de 0.5 m de profondeur (Figure 4.16, ligne C_0.5) et la fève semée en 2016 sur un sol argileux limoneux de 1.5 m de profondeur (Figure 4.17, ligne CL_1.5). Ces cas d'amélioration de la production sont plus nombreux pour la fève que pour le blé. Nous notons aussi l'existence de cas où la prise en compte de la connectivité entraîne une baisse de la production, comme pour le blé semé en 2010 sur un sol argileux de 1 m et 1.5 m de profondeur (Figure 4.16, ligne C_1 et C_1.5), et pour la fève semée en 2019 sur un sol argileux de 1 m et 1.5 m de profondeur (Figure 4.17, ligne C_1 et C_1.5).

Pour approfondir notre étude de l'effet de la connectivité sur le fonctionnement du blé et de la fève, nous étudions, sur les 12 150 écarts relatifs (Δ) entre simulations sans et avec connectivité, les occurrences des Δ qui sont supérieurs au seuil de significativité (0.11), et ce pour AGB (Δ AGB) et pour Yld (Δ Yld), comme décrit dans la section 2.2.3 (analyse des simulations de la parcelle Av, équation 4.7). Les occurrences de ces écarts, exprimées en pourcentages, sont données dans les Tableaux 4.7 ($\Delta > 0.11$ pour le blé), 4.8 ($\Delta > 0.11$ pour la fève), 4.9 ($\Delta < -0.11$ pour le blé) et 4.10 ($\Delta < -0.11$ pour la fève).

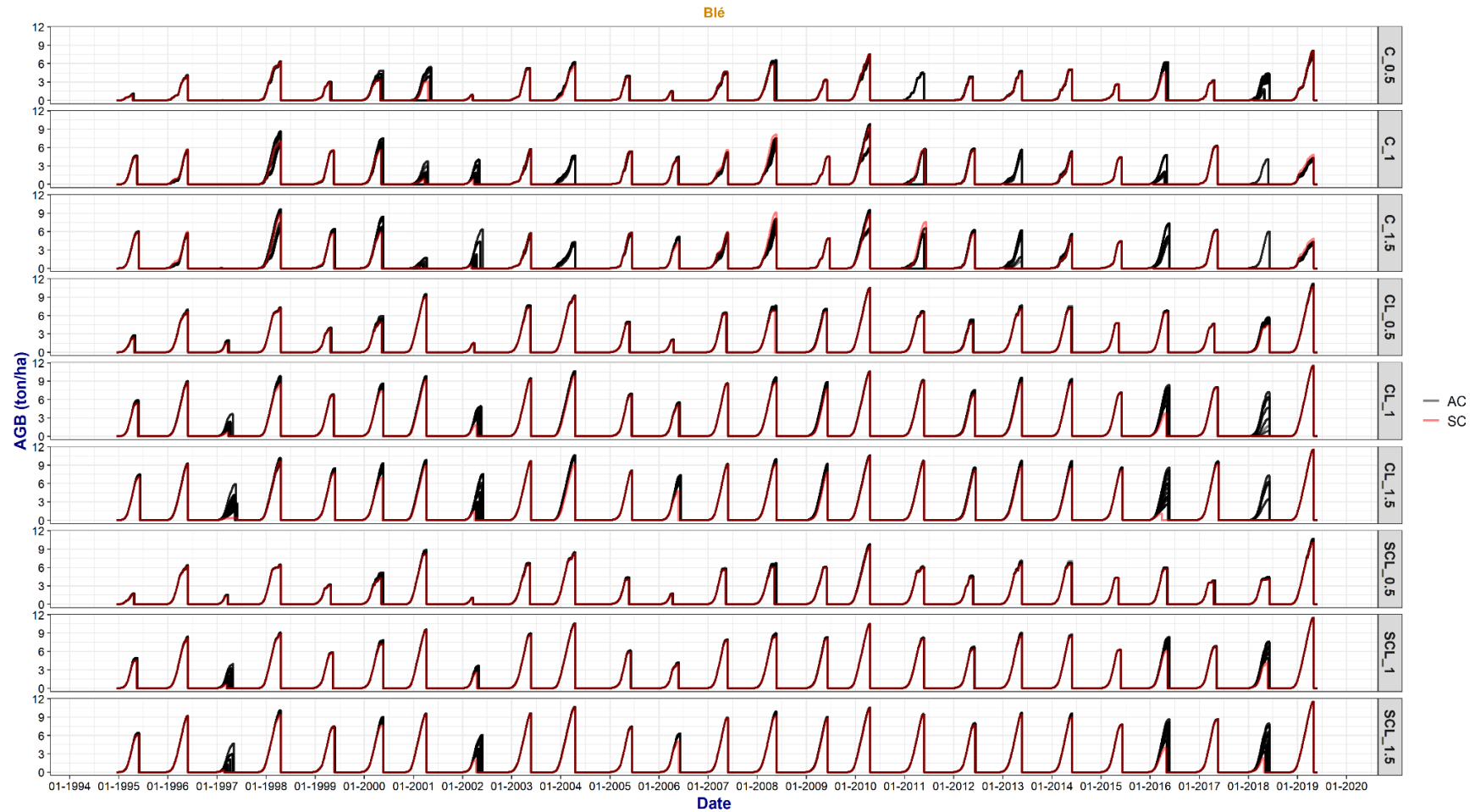


Figure 4.16 : Biomasse aérienne sèche (AGB) pour le blé sur 25 années de simulation, sans connectivité (SC, courbe rouge) et avec connectivité (AC, courbes noires). Chaque ligne correspond à une combinaison de texture et de profondeur du sol pour la parcelle Av. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement.

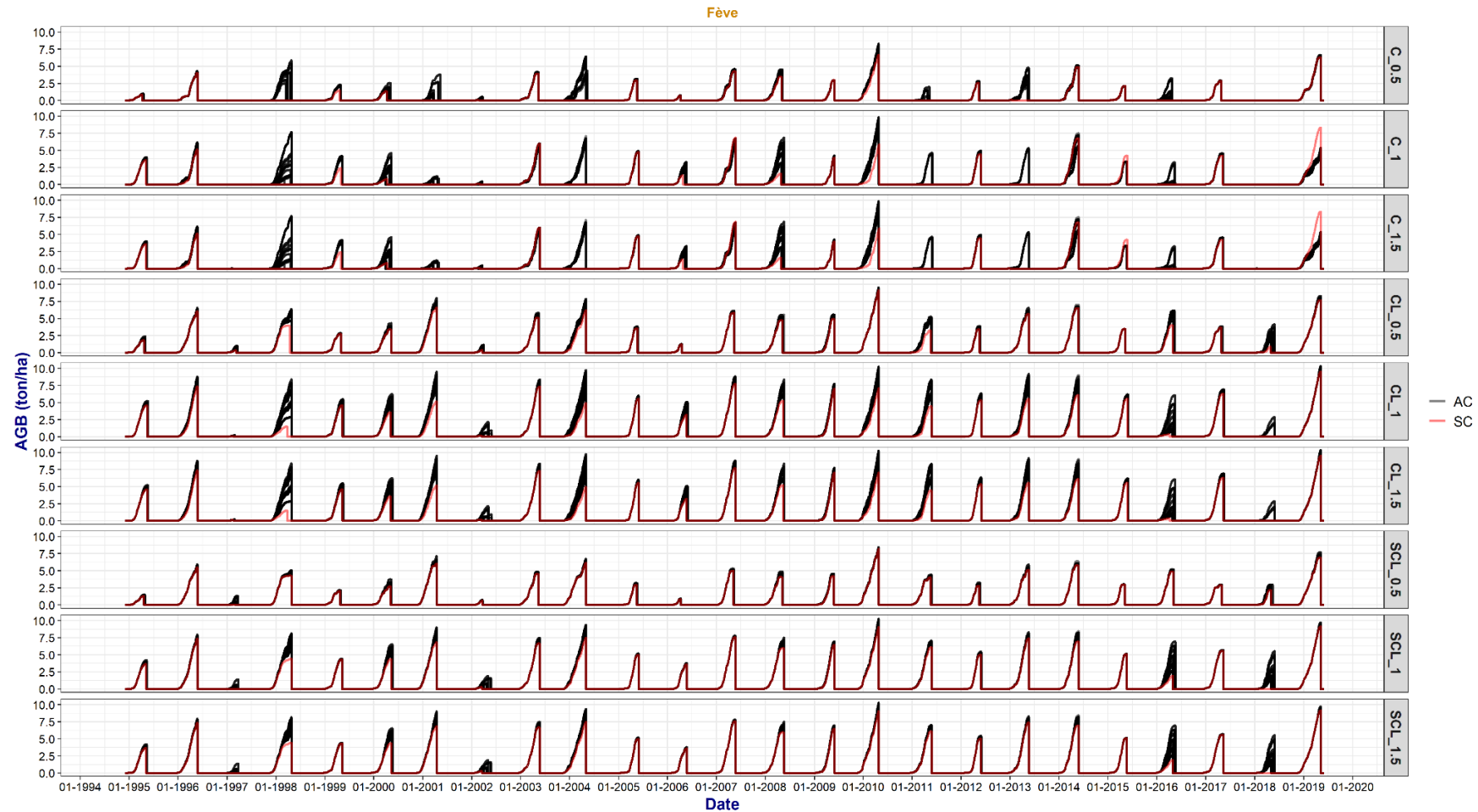


Figure 4.17 : Biomasse aérienne sèche (AGB) pour la fève sur 25 années de simulation, sans connectivité (SC, courbe rouge) et avec connectivité (AC, courbes noires). Chaque ligne correspond à une combinaison de texture et de profondeur du sol pour la parcelle Av. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement.

Tableau 4.7 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) positifs, sur les 12 150 échantillons, supérieurs au seuil de significativité (0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) pour **le blé** sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.

Variable	% total	Climat			Classe ruissellement amont				Texture			Profondeur du sol			Intervalle de variation
		SH	SHS	SA	C1	C2	C3	C4	C	CL	SCL	0.5	1	1.5	
Δ AGB > 0.11	12	0	44	56	22	24	27	27	33	45	22	12	31	57	[0.11 ; Inf]
Δ Yld > 0.11	20	0	40	60	17	25	30	29	32	47	22	20	32	48	[0.11 ; Inf]

Tableau 4.8 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) positifs, sur les 12 150 échantillons, supérieurs au seuil de significativité (0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) **pour la fève** sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.

Variable	% total	Climat			Classe ruissellement amont				Texture			Profondeur du sol			Intervalle de variation
		SH	SHS	SA	C1	C2	C3	C4	C	CL	SCL	0.5	1	1.5	
Δ AGB > 0.11	30	5	49	46	17	23	30	30	25	50	24	15	43	43	[0.11 ; Inf]
Δ Yld > 0.11	35	4	46	51	18	24	28	30	29	45	26	15	42	42	[0.11 ; Inf]

Tableau 4.9 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) négatifs, sur les 12 150 échantillons, inférieurs au seuil de significativité (-0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) **pour le blé** sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.

Variable	% total	Climat			Classe ruissellement amont				Texture			Profondeur du sol			Intervalle de variation
		SH	SHS	SA	C1	C2	C3	C4	C	CL	SCL	0.5	1	1.5	
Δ AGB < -0.11	3	29	25	46	20	12	26	42	100	0	0	2	39	59	[- 1 ; - 0.11]
Δ Yld < -0.11	3	30	32	38	19	8	26	47	100	0	0	3	42	55	[- 1 ; - 0.11]

Tableau 4.10 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) négatifs, sur les 12 150 échantillons, inférieurs au seuil de significativité (-0.11), de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yld) **pour la fève** sur la parcelle Av. Nous indiquons aussi la répartition de ces pourcentages entre les différentes valeurs des quatre facteurs d'influence considérés. SH, SHS et SA correspondent aux années subhumides, subhumides sèches et semi-arides, respectivement. C1, C2, C3 et C4 correspondent à la classe 1, 2, 3 et 4, respectivement, du ruissellement amont. C, CL et SCL correspondent à Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement.

Variable	% total	Climat			Classe ruissellement amont				Texture			Profondeur du sol			Intervalle de variation
		SH	SHS	SA	C1	C2	C3	C4	C	CL	SCL	0.5	1	1.5	
Δ AGB < -0.11	3	31	17	52	10	27	18	45	100	0	0	0	50	50	[- 0.41 ; - 0.11]
Δ Yld < -0.11	3	30	26	44	11	25	18	46	86	14	0	14	43	43	[- 0.4 ; - 0.12]

Les Tableaux 4.7 et 4.8 confirment que d'une manière générale, l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur la production agricole est plus important pour la fève que pour le blé. En effet, nous notons (1) 30% d'écarts relatifs pour AGB (Δ AGB) et 35% d'écarts relatifs de Yld (Δ Yld) supérieurs à 0.11 pour la fève, contre (2) seulement 12% d'écarts relatifs pour AGB (Δ AGB) et 20% d'écarts relatifs pour Yld (Δ Yld) supérieurs à 0.11 pour le blé. Pour les deux cultures, les écarts positifs significatifs varient entre 0.11 et Inf. Nous rappelons que les écarts relatifs avec de très grandes valeurs sont traités comme des gains absolus (Tableau 4.4).

Pour le blé, plus de $\frac{3}{5}$ des écarts relatifs Δ AGB et Δ Yld sont observés en années SA, et le reste des écarts sont observés en années SHS, alors qu'aucun écart significatif n'est observé en années SH. Il est important de rappeler que les 25 années prises en compte comportent initialement 8%, 40% et 52% d'années SH, SHS et SA, respectivement. La classe du ruissellement amont ne semble pas avoir un impact important sur l'amélioration de la production du blé, avec des pourcentages variant entre 22% et 30% (sauf en C1 pour Yld). Pour les deux variables de production, la majorité des écarts positifs significatifs sont observés (1) sur des sols argileux limoneux (CL) et argileux (C), avec des pourcentages de Δ de 46% et 33%, respectivement (moyenne sur AGB et Yld) et (2) sur des sols de moyennes (1 m) et de grandes profondeurs (1.5 m).

Pour la fève, la tendance des répartitions des écarts positifs significatifs entre les différentes classes de ruissellement amont et de profondeur du sol est semblable à celle du blé. Concernant la texture, la majorité des écarts positifs significatifs (Δ AGB et Δ Yld) sont observés sur des sols argileux limoneux (CL). La répartition des écarts en fonction des conditions climatiques est différente de celle du blé. En effet, 5% des écarts positifs significatifs sont observés en années SH, et le reste des écarts est réparti d'une manière égale entre les années SHS et les années SA.

Les Tableaux 4.9 et 4.10 montrent que pour les deux cultures, la connectivité inter-parcellaire peut, dans certains cas, avoir un effet négatif sur la productivité, engendrant ainsi une baisse de AGB et de Yld. En effet, nous notons des écarts entre simulations sans et avec connectivité allant de -1 à -0.11 pour le blé, et de -0.41 à -0.11 pour la fève. Cependant, le pourcentage des écarts négatifs significatifs est très faible, ne dépassant pas 3% des 12 150 échantillons. Ces écarts négatifs significatifs sont principalement observés en années SA, avec 46% de Δ AGB pour le blé (respectivement 52% pour la fève) et 38% de Δ Yld pour le blé (respectivement 44% pour la fève). Pour les deux cultures, la majorité de ces écarts sont observés avec un ruissellement amont de la classe C4 (ruissellements importants). Ils sont aussi observés uniquement sur sol argileux

(sauf pour Yld fève, où nous observons 14% des écarts en sol argileux limoneux) avec des profondeurs de 1 m et 1.5 m.

4. Discussion

La discussion des résultats de ce chapitre s'articule en deux grandes parties. Nous discutons dans la première partie l'effet de la connectivité hydrologique inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures, vue à travers la production agricole (biomasse aérienne sèche et rendement). Nous nous focalisons particulièrement dans cette première partie sur l'effet positif que peut avoir la connectivité sur la production agricole, tout en montrant que cet effet dépend principalement de la culture et des conditions environnementales (conditions climatiques et type de sol). Nous montrons également que cet effet est expliqué entre autres par les liens qui existent entre la ré-infiltration du ruissellement, la dynamique de l'eau dans le sol et la croissance du couvert végétal. Nous discutons aussi à la fin de cette partie l'effet négatif que peut avoir la connectivité sur la production agricole, dans certaines conditions, plutôt rares. Nous discutons dans la deuxième partie des conclusions que nous tirons de l'analyse de sensibilité réalisée pour les variables de productions agricoles et les indicateurs de fonctionnement agro-hydrologique. Nous étudions l'importance de chaque facteur d'influence dans la variation de ces variables et indicateurs, tout en menant une comparaison de nos résultats avec la littérature.

4.1. Effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures

4.1.1. Effet positif de la connectivité

L'analyse qualitative et quantitative de l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures prouve que le ruissellement amont peut, dans certains cas, améliorer la production agricole.

Tendances générales selon les conditions environnementales

D'après les Tableaux 4.7 et 4.8, l'amélioration de la production agricole s'observe principalement en années subhumides sèches (SHS) et semi-arides (SA), et la connectivité n'a que très peu d'influence sur le fonctionnement des cultures en années subhumides (SH) lorsque les apports d'eau par précipitation sont suffisants.

Nous avons aussi constaté que la fève est plus sensible à l'apport d'eau par connectivité que le blé. Pour ce dernier, l'effet positif de la connectivité se manifeste principalement en années semi-arides, caractérisées par des cumuls de pluies inférieurs à la moyenne, tandis que pour la fève,

l'effet positif de la connectivité est observé à la fois en années semi-arides (SA) et en années subhumides sèches (SHS) (Tableau 4.7 et 4.8). Ceci montre que la fève est plus sensible au stress hydrique que le blé. Ces propos sont confirmés par une analyse du coefficient du stress hydrique K_s , calculé pour les deux cultures en cas de simulations sans connectivité, et ce pour toutes les combinaisons texture/profondeur du sol, sur 25 ans (Figure 4.18). Cette figure montre que dans la plupart des combinaisons étudiées, la fève possède un K_s inférieur à celui du blé, prouvant ainsi que la fève est généralement plus stressée que le blé. Ceci peut être expliqué par (1) un cycle phénologique plus court pour la fève, et donc un fonctionnement cultural plus sensible à la variation intra-annuelle des pluies et (2) un système racinaire plus court ne permettant pas à la fève d'utiliser les quantités d'eau stockées en profondeur.

Nous remarquons aussi que pour les deux cultures, le rendement est plus sensible à la connectivité inter-parcellaire que la biomasse (Tableau 4.7 et 4.8). En effet, AquaCrop calcule le rendement en fonction de la biomasse et de l'indice de récolte (HI) qui est sensible au stress hydrique (Ali et Talukder, 2008).

La connectivité inter-parcellaire améliore la production agricole particulièrement sur les sols argileux limoneux (CL) et argileux (C) moyennement profonds et très profonds (Tableau 4.7 et 4.8). Ceci peut être expliqué par les pertes d'eau par percolation, qui sont plus faibles sur ces sols, en comparaison (1) aux sols sableux-argileux-limoneux (SCL) et (2) aux sols peu profonds (Figure 4.10), augmentant ainsi la quantité d'eau disponible dans la zone racinaire.

L'analyse des écarts relatifs positifs montre, que pour les deux cultures, la répartition de ces écarts entre les différentes classes de ruissellement amont est semblable (Tableau 4.7 et 4.8). Ainsi peu importe la quantité d'eau apportée par le ruissellement, l'effet de ce dernier dépend principalement des conditions climatiques et des caractéristiques du sol (texture et profondeur).

Afin de mieux comprendre cet effet positif de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures, et d'identifier d'éventuelles tendances, nous représentons dans la Figure 4.19 la répartition des pourcentages des écarts relatifs (Δ) positifs pour AGB, supérieurs au seuil de significativité (0.11), identifiés dans les tableaux 4.7 et 4.8, en fonction des différentes combinaisons texture/profondeur, et ce pour chaque année. Dans cette figure, nous ne distinguons pas les pourcentages de Δ selon les différentes classes de ruissellement.

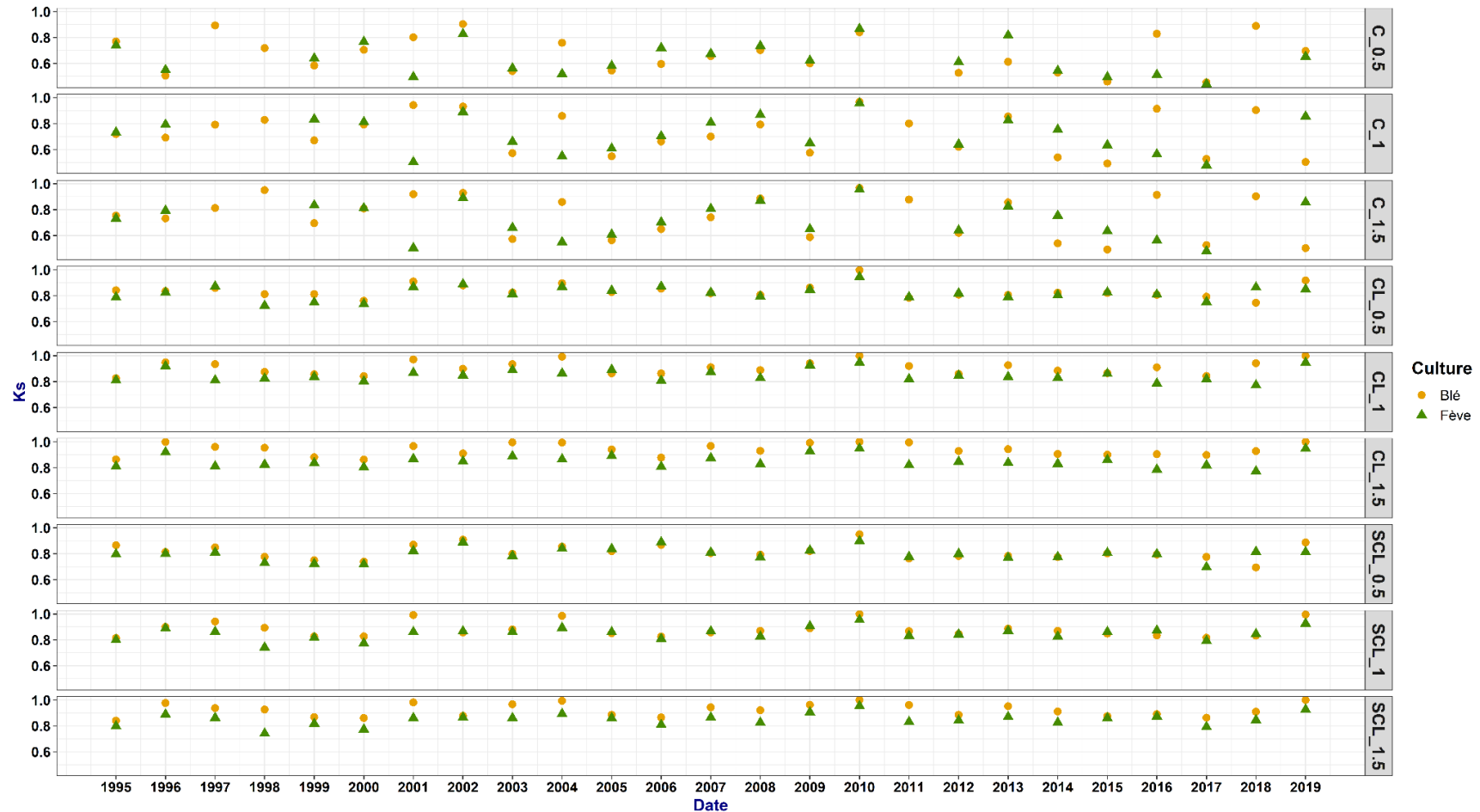


Figure 4.18 : Coefficient de stress hydrique (K_s) moyen, calculé pour la fève (points triangulaires verts) et pour le blé (points ronds jaunes) en cas de simulations sans connectivité. Dans cette figure, un K_s égale à 1 correspond à l'absence de stress hydrique, tandis qu'un K_s égale à 0 correspond un stress total. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement. Les années pour lesquelles il n'y a pas de valeurs de K_s , correspondent à des années pour lesquelles la végétation n'a pas poussé.

Blé

0%	0%	12	13%	4%	53%	0%	20%	0%	33%	0%	33%	0%	2%	17%	0%	6%	2%	18%	7%	0%	58%	0%	34%	0%	
1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
			54%	37%	39%				48%				6%			50%					67%		6%		C_0.5
					83%				78%									50%			17%		6%		C_1
			61%		83%		17%		78%								11%	50%			50%		6%		C_1.5
		100%			22%		56%				100%			67%			6%	56%			100%		63%		CL_0.5
					70%		50%		91%		100%			89%			6%	56%	61%		100%		30%		CL_1
					100%																100%		22%		CL_1.5
					22%																				SCL_0.5
		6%			56%		56%				100%										89%		100%		SCL_1
																					100%		83%		SCL_1.5

Fève

6%	35%	0%	80%	33%	58%	49%	3%	8%	62%	0%	41%	10%	69%	2%	69%	44%	16%	40%	30%	19%	49%	0%	17%	1%	
1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
			50%		6%	13%			39%				56%		100%										C_0.5
15%	72%		69%	100%	39%				28%		83%		100%		100%	17%	6%	17%	2%		17%				C_1
15%	72%		69%	100%	39%				28%		83%		100%		100%	17%	6%	17%	2%		17%				C_1.5
			100%		22%	41%		13%	89%				13%	20%		100%		6%			100%		19%		CL_0.5
6%	83%		100%	50%	100%	100%	6%	22%	100%		100%	44%	89%		100%	100%	67%	100%	83%	83%	56%		17%		CL_1
6%	83%		100%	50%	100%	100%	6%	22%	100%		100%	44%	89%		100%	100%	67%	100%	83%	83%	56%		17%		CL_1.5
			35%		37%	6%							22%					6%						6%	SCL_0.5
6%			100%		89%	89%	7%	6%	89%				74%		59%	33%		6%	50%		100%		50%		SCL_1
6%			100%		89%	89%	7%	6%	89%				74%		59%	33%		6%	50%		100%		50%		SCL_1.5

Figure 4.19 : Pourcentage des écarts relatifs (Δ) positifs, sur les 12 150 échantillons, supérieurs au seuil de significativité (0.11), pour la biomasse aérienne sèche, en considérant (1) chaque année sur 25 ans, (2) chaque combinaison texture/profondeur du sol, et (3) chaque culture. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs de sol de 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement. Les couleurs des différentes colonnes représentent la classification des années climatiques : vert pour une année subhumide, jaune pour une année subhumide sèche et orange pour une année semi-aride. Le pourcentage au sein des cellules blanches correspond à la moyenne des pourcentages pour l'année en question (moyenne sur la colonne).

Analyse pour les années semi-arides (SA)

D'après la Figure 4.19, nous remarquons que parmi les années semi-arides, par exemple 2016 et 2018 (rectangles rouges), caractérisées par des cumuls annuels de pluies de 416 mm et 548 mm, respectivement (Figure 4.2), l'apport de l'eau par la connectivité inter-parcellaire présente des effets similaires sur les deux cultures. Au cours de ces années, la connectivité a amélioré la production de la biomasse aérienne sèche sur la majorité des sols (texture/profondeur). En effet, grâce à la ré-infiltration des eaux de ruissellement amont, le stock d'eau dans le sol a augmenté, permettant ainsi aux cultures (blé comme fève) de se développer. Pour illustrer ces propos, nous avons comparé dans la Figure 4.20 et 4.21 l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC), du taux de couverture végétale (CC), de la biomasse (AGB) et du rendement (Yld), pour une simulation sans connectivité (SC) et une autre avec connectivité (AC), et ce pour les deux années précitées, et pour le blé semé sur un sol argileux limoneux de 1.5 m de profondeur (CL_1.5). Cette figure montre des humidités de sol plus importantes en AC qu'en SC, ce qui permet le développement du couvert végétal et la production de la biomasse. Pour cet exemple, le ruissellement amont a augmenté l'infiltration annuelle de 24 mm et 27 mm, en 2016 et 2018, respectivement. Grâce à ces quantités d'eau supplémentaire, nous avons enregistré des écarts relatifs de biomasse aérienne sèche (Δ AGB) variant de 7 à 81 et un gain absolu de rendement (de 0 à 3 ton/ha environ).

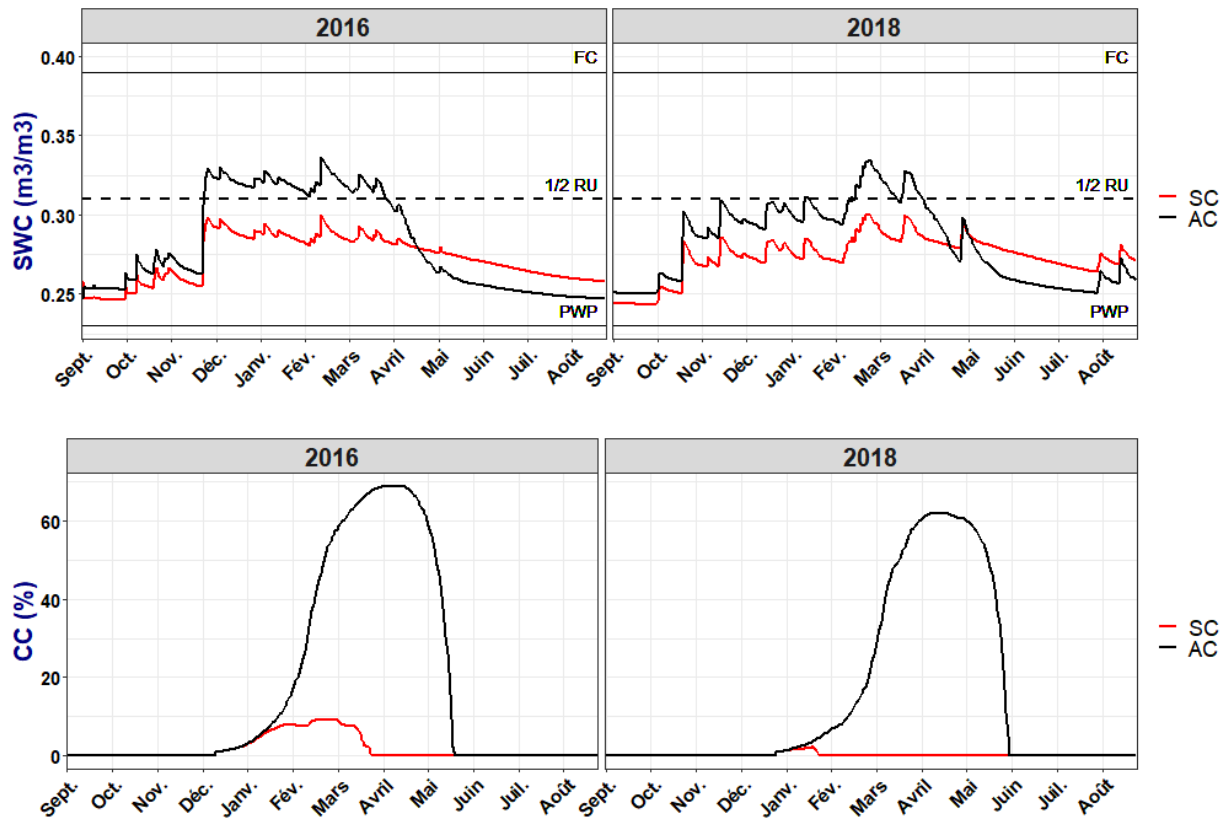


Figure 4.20 : Comparaison de l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC) et du taux de couvert végétale (CC), pour un blé semé sur un sol argileux limoneux de 1.5 de profondeur, entre simulations sans et avec connectivité (SC et AC, respectivement), et ce pour les années 2016 et 2018. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent et l'humidité du sol à la capacité au champ, respectivement. 1/2 RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.

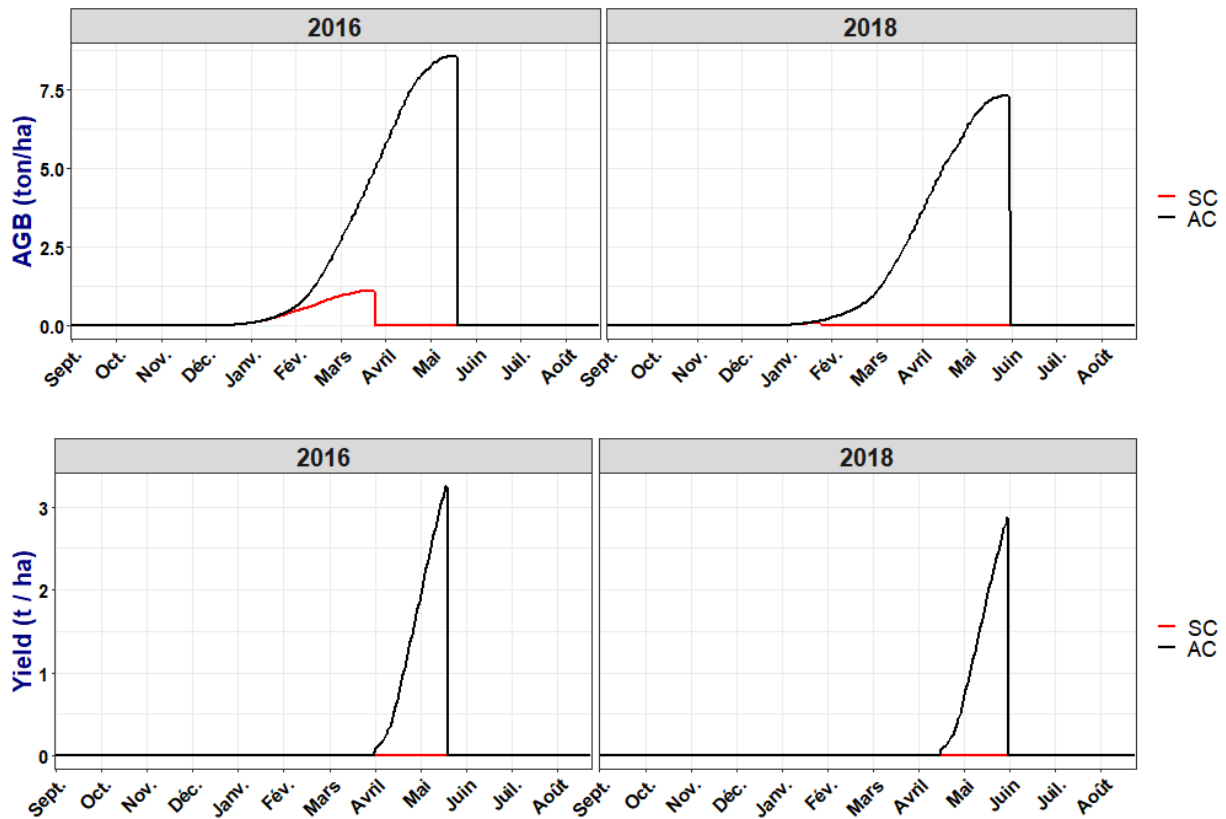


Figure 4.21 : Comparaison de la production de la biomasse aérienne sèche (AGB) et du rendement (Yield) du blé, semé sur un sol argileux limoneux de 1.5 de profondeur, entre simulations sans et avec connectivité (SC et AC, respectivement), et ce pour les années 2002, 2016 et 2018.

Analyse pour les années subhumides sèches (SHS)

L'effet positif de la connectivité inter-parcellaire sur la production agricole en années subhumides sèches, notamment pour la fève, est étroitement liée à la répartition intra-annuelle des pluies.

Pour introduire ce propos, nous nous appuyons dans un premier temps sur la Figure 4.19. D'une part, nous constatons un effet positif de la connectivité, sur la majorité des sols, pour le groupe d'années A qui inclut les années 1998, 1999, 2004, 2010 et 2013 (rectangles violets), caractérisées par des cumuls de pluies annuels de 750 mm, 700 mm, 708 mm, 650 mm et 622 mm, respectivement (Figure 4.2). D'autre part, nous constatons peu d'effet de la

connectivité, sur la majorité des sols, pour le groupe d'année B qui inclut les années 2003, 2005 et 2009, caractérisées par des cumuls de pluies annuels très similaires : 728 mm, 651 mm et 793 mm, respectivement (Figure 4.2). Ces observations suggèrent que la ré-infiltration des eaux de ruissellement amont a amélioré la production agricole de la fève pour le groupe d'années A, et ne l'a pas amélioré pour le groupe B. Notons que pour l'année 2003, nous considérons qu'il n'y a pas d'amélioration car (1) les valeurs de Δ sont inférieures à 0.14 et (2) le pourcentage moyen d'écart observés pour cette année est de 8% (Figure 4.19).

Pour confirmer ce propos, nous comparons les simulations sans connectivité (SC) entre ces deux groupes d'années, puis nous analysons l'apport des connectivités pour le groupe A. Nous identifions des situations typiques que nous discutons ci-dessous, les autres situations sont illustrées dans les figures B.4, B.5 et B.6 de l'annexe B. La Figure 4.22 présente l'évolution de SWC et CC pour le groupe A (années 2004 et 2010) et le groupe B (années 2003, 2005 et 2009), et ce en considérant la culture de fève sur un sol argileux limoneux ayant une profondeur d'un mètre (CL_1).

- Nous remarquons qu'en 2004, le développement de CC en début d'année hydrologique était semblable à celui de 2003, grâce à un mois de septembre humide (cumul mensuel le plus important en 25 ans, Figure 4.3), ce qui a permis la recharge du sol en début de saison. Contrairement à 2003, les mois de janvier et février en 2004 étaient très secs, ce qui a entraîné une baisse de l'humidité du sol, pour atteindre un niveau inférieur à la moitié de la réserve utile mi-mars, empêchant ainsi un développement correct de la végétation (stagnation de CC).
- Similairement, nous remarquons qu'en 2010, l'humidité du sol en début d'année hydrologique était supérieure à celles des années 2003, 2005 et 2009, grâce aux pluies du mois de septembre et d'octobre (Figure 4.3). Cependant, la période particulièrement sèche entre novembre et mars 2010 a induit une chute de l'humidité du sol, ce qui a empêché la culture de bien se développer (stagnation de CC).
- De façon contrastée, nous remarquons qu'en 2005 et 2009, le développement de la fève a commencé avec un certain retard, à cause des faibles pluies au début du cycle (et donc un semis tardif). Cependant, grâce aux précipitations sur janvier - avril (Figure 4.3), la culture a bien rattrapé son retard de croissance, ce qui implique que les pluies durant cette période sont importantes pour le développement de la fève. Par ailleurs, l'humidité du sol a augmenté pour se rapprocher de FC, grâce aux précipitations sur janvier - avril, ce qui

explique que l'apport d'eau par connectivité inter-parcellaire n'a pas d'effet sur la production agricole de la fève, en 2005 et 2009.

- Pour la fève cultivée en 2004 et 2010, la connectivité inter-parcellaire augmente les quantités d'eau infiltrées de 84 mm en 2004 et de 91 mm en 2010. En 2004, ces quantités d'eau supplémentaires engendrent une augmentation de la biomasse et du rendement avec des écarts relatifs de 0.98 et de 1, respectivement. En 2010, les écarts relatifs entre simulation sans et avec connectivité sont de 0.45 à la fois pour la biomasse et le rendement.

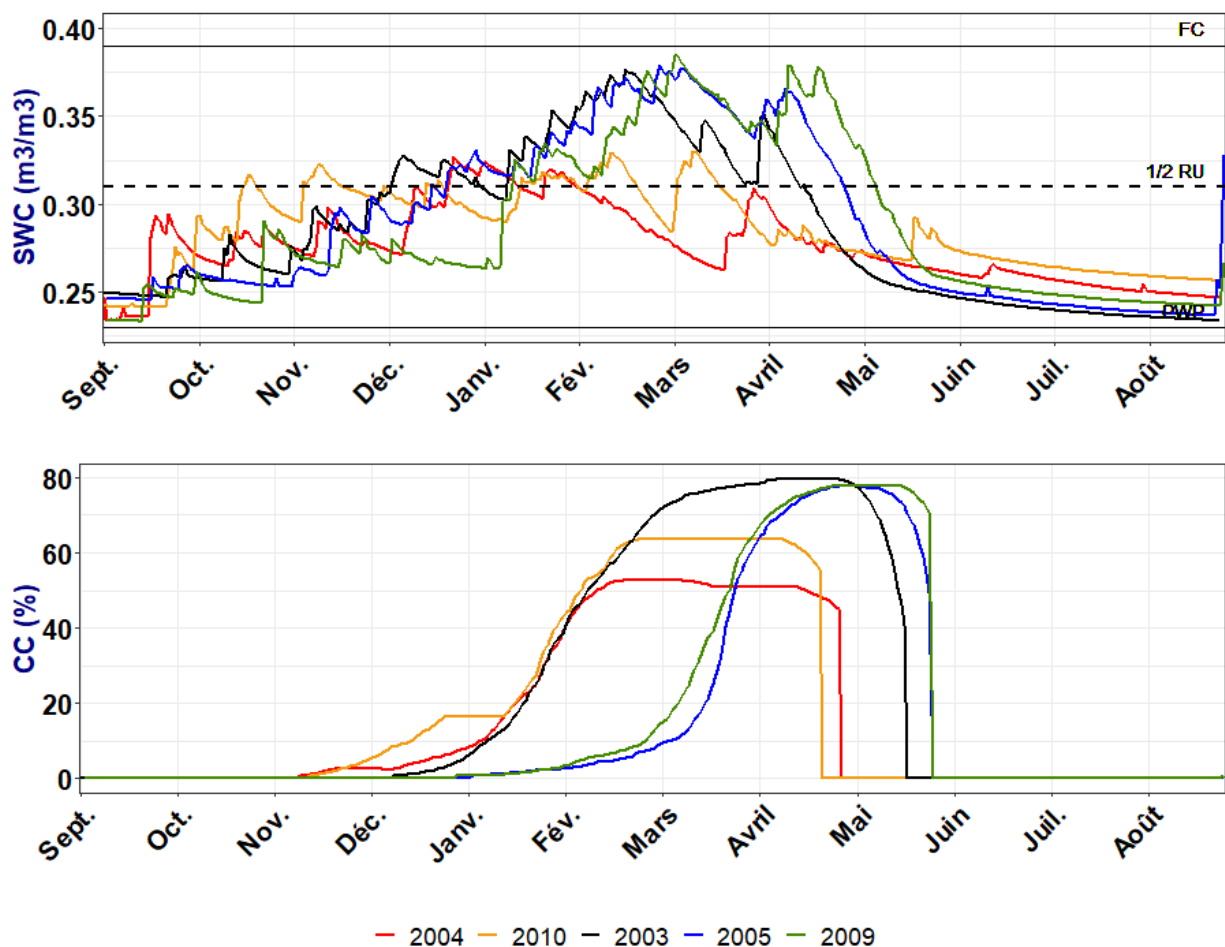


Figure 4.22 : Comparaison de l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC) et du taux de couverture végétale (CC) simulées sans connectivité (SC), en 2004 et 2010 avec celles des années 2003, 2005 et 2009, pour la fève, semée sur un sol argileux limoneux de 1 m de profondeur. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent et l'humidité du sol à la capacité au champ, respectivement. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.

Nous savons grâce à l'analyse des Tableaux 4.7 et 4.8 que contrairement à la fève, l'effet de la connectivité en années subhumides sèches (SHS) sur le fonctionnement du blé est faible. Cependant, nous observons dans la Figure 4.19 qu'en 2000, la connectivité a amélioré la

production de la biomasse à la fois pour le blé et pour la fève (rectangle bleu). Cette année est la seule année subhumide sèche (SHS) durant laquelle la connectivité a un effet important sur la production du blé, pour la majorité des sols, avec un effet semblable à celui observé en année semi-aride (SA), comme par exemple 2016. Pour comprendre ce cas particulier, nous avons comparé les cumuls des pluies mensuels (Figure 4.23) et l'humidité du sol sans connectivité (Figure 4.24) pour l'année 2000 (année SHS avec effet de connectivité), l'année 2003 (année SHS sans effet de connectivité) et l'année 2016 (année SA avec effet de connectivité).

- D'après la Figure 4.23, nous remarquons que pour l'année 2000 et à l'exception des mois de septembre et novembre, pour lesquels les cumuls de pluie mensuels sont importants (mois de novembre le plus humide en 25 ans avec un cumul de pluie de l'ordre de 380 mm) (Figure 4.3), les cumuls mensuels pour le reste de l'année sont inférieurs à la moyenne (Figure 4.3 et Figure 4.23). La comparaison de ces cumuls de pluie avec ceux des années 2003 et 2016 indique que la répartition intra-annuelle des pluies en 2000 est plus proche de celle de l'année 2016 que de celle de l'année 2003.
- La comparaison de l'évolution temporelle des humidités du sol confirme ces propos. La Figure 4.24 montre que l'humidité du sol en 2000 est beaucoup plus proche de l'année 2016 que de l'année 2003, notamment à partir du mois de mars.

Ceci confirme que la répartition intra-annuelle des pluies ainsi que la dynamique de l'eau dans le sol durant l'année 2000 est similaire à celle d'une année semi-aride, ce qui explique l'effet observé de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement du blé pour cette année.

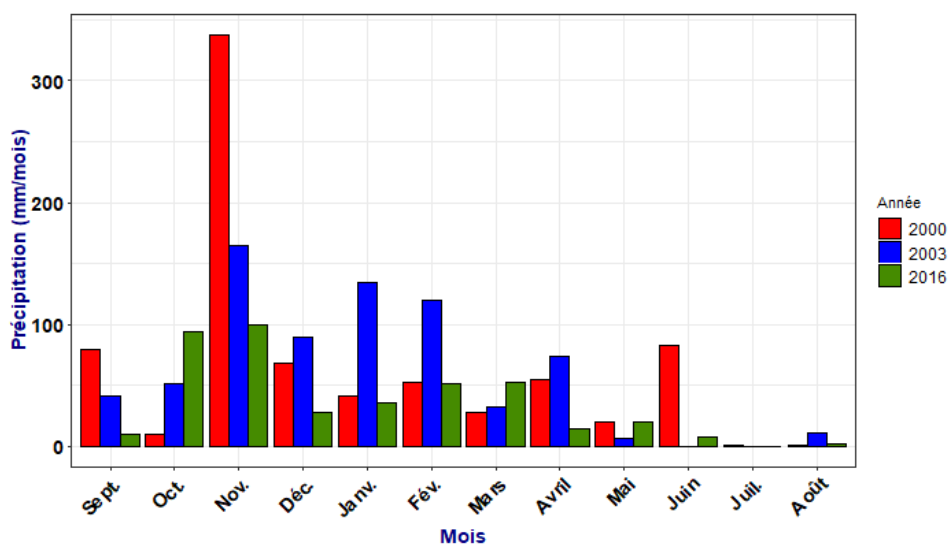


Figure 4.23 : Comparaison des cumuls mensuels de pluie observés en 2000 (rouge), 2003 (bleu) et 2016 (vert).

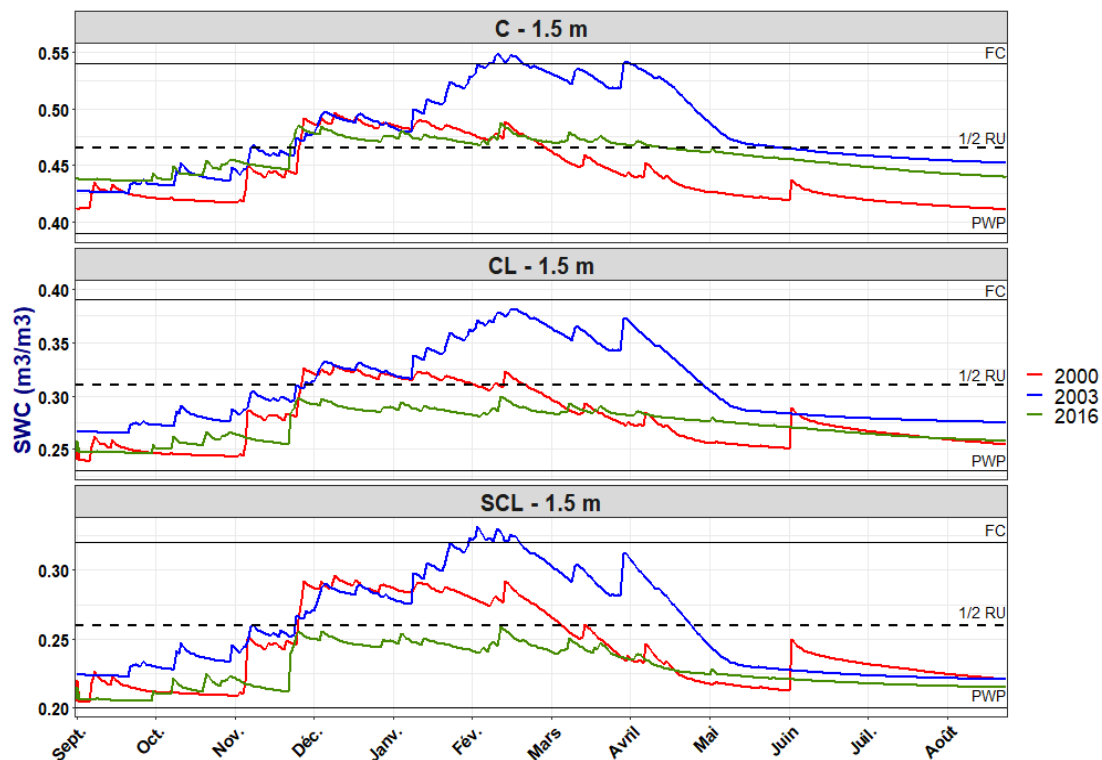


Figure 4.24 : Comparaison des évolutions temporelles de l'humidité du sol (SWC), sans connectivité, en 2000 (courbe rouge), 2003 (courbe bleue) et 2016 (courbe verte), pour le blé semé sur un sol de profondeur 1.5 m (trois textures considérées). C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent et l'humidité du sol à la capacité au champ, respectivement. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.

Avec cet exemple, nous remarquons la limite de la méthode de classification des années climatiques, basée sur les cumuls annuels des pluies. Avec une telle approche, il est difficile de considérer l'effet de la variabilité intra-annuelle des pluies, présentant, selon nos résultats, un effet important dans la détermination de l'impact de la connectivité sur la production agricole.

4.1.2. Effet négatif de la connectivité

D'après les Tableaux 4.9 et 4.10, la connectivité inter-parcellaire peut avoir, dans des cas rares (uniquement 3% des écarts relatifs Δ calculés), un effet négatif sur la production agricole, se traduisant par une baisse de productivité. Cette baisse de productivité peut être expliquée par le phénomène d'asphyxie racinaire, due à un engorgement de la zone racinaire, suite à des périodes suffisamment humides pour créer des conditions d'anaérobie. Pour les simulations avec connectivité, la ré-infiltration des eaux de ruissellement a augmenté la quantité d'eau dans

le sol, pour dépasser à plusieurs reprises, durant quelques jours, la capacité au champ (FC) et atteindre l'humidité du sol à saturation (SAT), réduisant ainsi la quantité d'oxygène dans la zone racinaire. L'effet de ce manque d'aération dans la zone racinaire est traduit par une fermeture stomatique, qui diminue la transpiration et la croissance racinaire. La diminution de la transpiration implique une diminution de la biomasse aérienne sèche et du rendement (Tian et al., 2021).

L'exemple de la fève semée en 2015 sur un sol argileux de 1.5 m de profondeur est caractéristique. Cette année est considérée comme année semi-aride (cumul annuel de pluie de 604 mm), caractérisée par une alternance de périodes humides durant lesquelles les cumuls mensuels de pluie sont supérieurs à la moyenne (novembre-décembre ; février-mars) et des périodes sèches durant lesquelles les cumuls mensuels de pluie sont inférieurs à la moyenne (septembre-octobre ; janvier ; avril-mai-juin-juillet-aout) (Figure 4.3). Afin d'étudier plus finement les simulations de cet exemple, nous avons analysé l'évolution temporelle de la transpiration, de la profondeur racinaire, du contenu en eau total du sol (Figure 4.25) ainsi que de l'humidité dans chaque horizon du sol (Figure 4.26), et ce pour les simulations sans et avec connectivité. La comparaison des humidités de sol montre que le sol est plus humide en considérant la ré-infiltration des eaux de ruissellement (AC). La différence entre les deux humidités, sans et avec connectivité est faible en début d'année, et elle s'accroît après les pluies du mois de novembre. La comparaison de l'évolution temporelle de la transpiration montre que pour les deux simulations, la transpiration de la plante commence avec le même rythme.

- Un premier décrochage est observé le 02-02-2015 avec une transpiration plus importante pour la simulation sans connectivité SC. Ce décrochage s'explique par une différence d'humidité du sol dans le 4ème horizon de la zone racinaire, avec une valeur supérieure à FC pendant quelques jours pour la simulation avec connectivité AC (Figure 4.26). Ce décrochage a engendré une différence de croissance racinaire, avec des racines moins profondes pour la simulation AC.
- Un deuxième décrochage entre la transpiration sans et avec connectivité est observé le 09-03-2015, accentuant ainsi la différence de profondeur racinaire entre les deux simulations. Ce décrochage s'explique par une différence d'humidité du sol dans le 5ème horizon de la zone racinaire, avec une valeur supérieure à FC pendant quelques jours pour la simulation avec connectivité AC (Figure 4.26). Ces conditions d'humidité du sol supérieure à FC

engendre des conditions d'anaérobie pour la plante et donc une baisse de la transpiration végétale. Cette dernière induit une baisse de la biomasse aérienne sèche et du rendement.

- Le dernier décrochage entre les Tr des deux simulations, observé le 21-04-2015 n'est pas dû aux conditions d'anaérobie du sol mais plutôt à une faible humidité du sol (pour les deux simulation) à cause d'un mois d'avril particulièrement sec (le mois d'avril le plus sec sur 25 ans) (Figure 4.3).

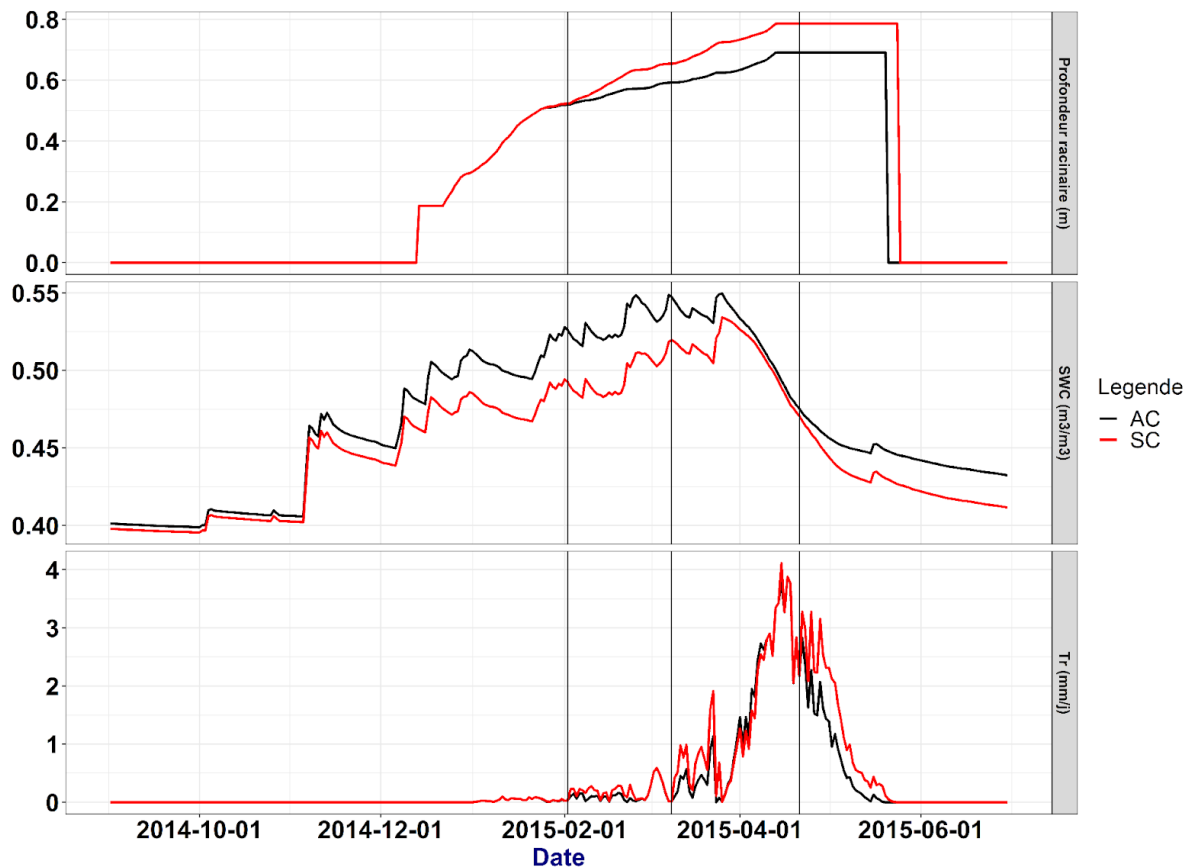


Figure 4.25 : Évolution temporelle de la profondeur racinaire (première ligne), de l'humidité du sol (deuxième ligne) et de la transpiration végétale (troisième ligne) pour la fève, cultivée en 2015, sur un sol argileux d'une profondeur de 1.5 m (C_1.5). La courbe rouge correspond à la simulation sans connectivité (SC). La courbe noire correspond à la simulation avec connectivité (AC). SWC correspond à l'humidité du sol, et Tr correspond à la transpiration. Les lignes verticales correspondent aux dates auxquelles un décrochage entre les courbes sans et avec connectivité est observé au niveau de la transpiration.

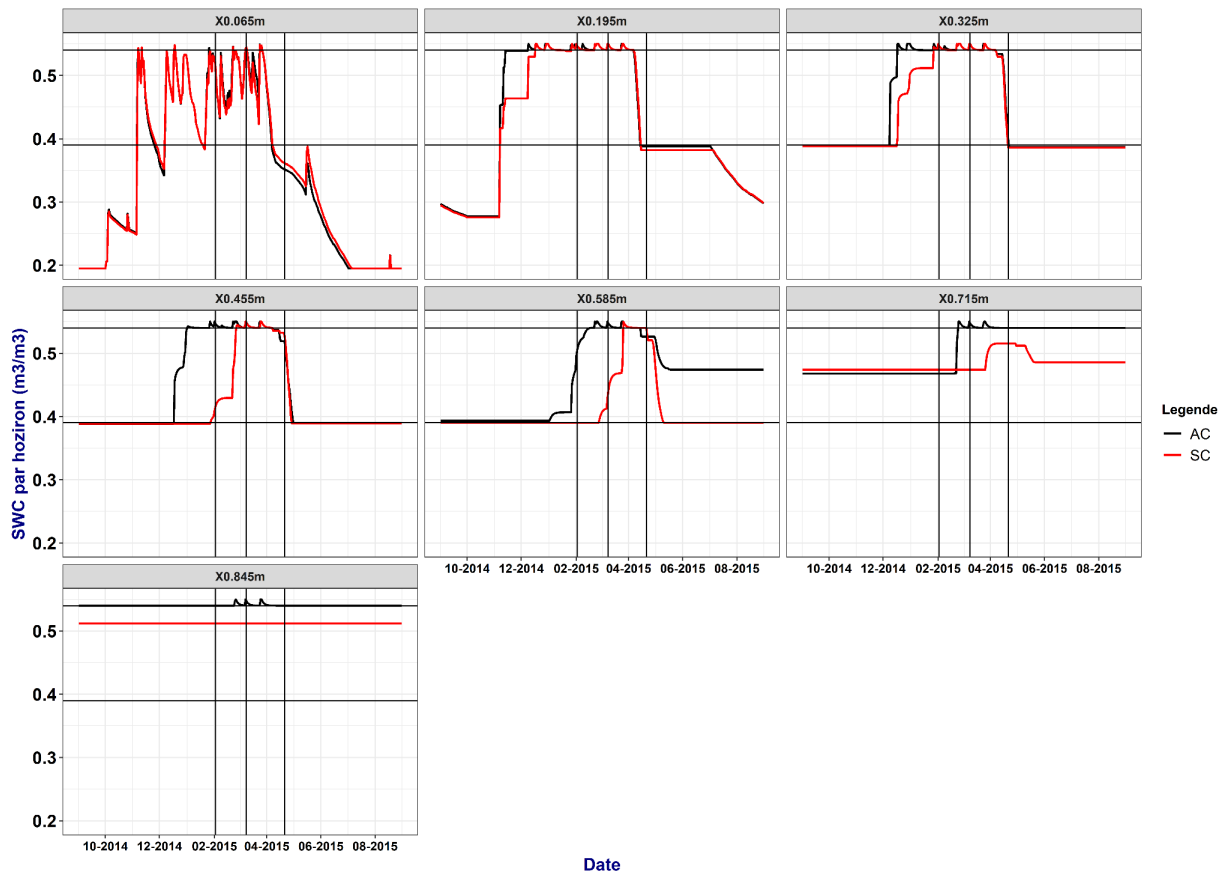


Figure 4.26 : Évolution temporelle de l'humidité du sol de chaque horizon de sol, pour la fève, cultivée en 2015, sur un sol argileux d'une profondeur de 1.5 m (C_1.5). X0.065 m, X0.195 m, X0.325 m, X0.455 m, X0.585 m, X0.715 m et X0.845 m correspondent aux horizons 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 du sol. La courbe rouge correspond à la simulation sans connectivité (SC). La courbe noire correspond à la simulation avec connectivité (AC). Les lignes verticales correspondent aux dates auxquelles un décrochage entre les courbes sans et avec connectivité est observé au niveau de la transpiration. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs de PWP et FC.

Bien qu'AquaCrop soit principalement utilisé dans des conditions de stress hydrique, le modèle simule l'effet de l'engorgement d'eau de la zone racinaire sur l'expansion racinaire, la transpiration et l'accumulation de la biomasse. Quand l'humidité de la zone racinaire dépasse un certain seuil au-dessus de la capacité au champ et en dessous de la saturation, la quantité d'oxygène dans cette zone diminue. L'effet de ce manque d'air est traduit par un coefficient de stress d'aération qui réduit la transpiration de la culture et donc la biomasse et le rendement (Raes et al., 2009). Dans le cadre de notre étude, nous observons ce phénomène pour des sols de profondeur 1 et 1.5 m. Ainsi, l'absence de baisse de productivité significative sur un sol peu profond s'explique par une percolation plus importante sur les sols de faibles profondeurs, caractérisée par des coefficients de percolation plus élevés (Figure 4.10).

La littérature est riche d'études évaluant l'effet de l'engorgement d'eau du sol sur l'expansion racinaire, la transpiration, la biomasse, le rendement et l'efficacité agronomique de l'eau (Pampana et al., 2016 ; de San Celedonio et al., 2017 ; Farkas et al., 2020). L'effet de l'engorgement d'eau dépend principalement de sa durée, du type de la culture, et du stade phénologique auquel il intervient (Tian et al., 2021). Tian et al. (2021) ont rapporté une réduction du rendement de 60% pour le coton contre seulement 26% pour le blé. Ils ont aussi souligné une réduction du rendement de 42% quand l'engorgement se produit pendant la phase de reproduction, contre 35% pendant la phase végétative. Contrairement à d'autres modèles, l'effet de l'engorgement dans AquaCrop ne dépend pas du stade phénologique. De plus, le modèle a été peu évalué dans ces circonstances de stress (Liu et al., 2020). Cependant, selon les dires d'experts, l'asphyxie des plantes suite à la stagnation des eaux de pluie sur des sols argileux a été déjà observée à Kamech.

4.2. Analyse de sensibilité

Indicateurs de fonctionnement hydrologique

Grâce au plan d'expérimentation numérique mis en place, nous avons produit une large gamme de ruissellement amont, prenant en compte une large variabilité de conditions environnementales. Ceci nous permet d'étudier l'effet de la connectivité inter-parcellaire en considérant des conditions hydrologiques très différentes.

Bien que les conditions climatiques et la texture du sol influencent la genèse du ruissellement au niveau de la parcelle aval (variation statistiquement significative de RC en fonctions de ces deux variables), la quantité d'eau ruisselée en aval dépend principalement de la quantité d'eau reçue de l'amont (Figures 4.10 et 4.11). Comme pour le ruissellement, la percolation de l'eau vers la nappe est fortement liée à l'apport de l'eau par connectivité inter-parcellaire. Ce résultat est conforme avec les résultats de la littérature sur l'influence de la connectivité hydrologique sur la production de l'eau bleue au sein d'un bassin versant (Okin et al., 2015 ; Zuecco et al., 2019).

Variables et indicateurs agronomiques

Les résultats de l'analyse de sensibilité convergent avec les conclusions tirées de l'étude de l'effet de la connectivité inter-parcellaire. Bien que dans certains cas, le ruissellement amont puisse avoir un effet positif (plus rarement négatif) sur la production agricole (variation

significative en fonction des classes du ruissellement amont, Figure 4.12), cette dernière est principalement contrôlée par les conditions climatiques et le type du sol (texture et profondeur). Ceci se traduit par des indices de sensibilités plus importants pour les facteurs sol et les conditions climatiques que pour le ruissellement amont (Figure 4.13).

Ensemble, la texture et la profondeur du sol expliquent plus que 57% de la variation de AGB et de Yld, et plus que 85% de la variation de WUE_{AGB} et de WUE_{Yld} (Figure 4.13 et 4.15). Il existe dans la littérature plusieurs études caractérisant WUE en fonction des paramètres du sol (Sadras et Calviño, 2001 ; Calviño et al., 2003 ; Jalota et al., 2010 ; Daryanto et al., 2017). La texture du sol est un facteur influençant plusieurs propriétés du sol notamment la conductivité hydraulique du sol et sa capacité de rétention d'eau (Mojid et al., 2012). Associée à la profondeur du sol, ces deux facteurs définissent le réservoir utile du sol et donc la quantité d'eau potentiellement disponible pour la plante (Cousin et al., 2022). Mbava et al. (2020) ont rapporté des WUE plus importantes sur des sols limoneux que sur des sols argileux. Les sols riches en limons sont des sols plus fertiles avec des capacités de stockage d'eau plus importantes que celles des sols argileux (Mbava et al., 2020). L'augmentation de la productivité avec l'augmentation de la profondeur du sol peut être expliquée d'une part par l'augmentation du réservoir utile, et d'autre part par le développement racinaire plus important sur les sols profonds.

Bien que le poids relatif que joue le climat dans la variation des variables de production agricole et des indicateurs de fonctionnement agronomique est plus faible que celui des facteurs sol, la variation de AGB, Yld, WUE_{AGB} et WUE_{Yld} en fonction des conditions climatiques est significative. Ce résultat est attendu notamment en agriculture pluviale, où la croissance et le développement des cultures sont étroitement liées aux conditions climatiques et en particulier les précipitations. Pour les deux cultures, le poids relatif des conditions climatiques est plus important pour AGB et Yld que pour WUE_{AGB} et WUE_{Yld} . La diminution de la valeur de SI des conditions climatiques en passant des variables de production agricoles aux indicateurs de fonctionnement agronomique peut être expliquée par la normalisation de ces indicateurs par le cumul de pluie annuel. Nos résultats montrent aussi que la production agricole en termes de AGB et de Yld décroît en passant d'une année subhumide, caractérisée par une pluviométrie importante, à une année semi-aride caractérisée par une pluviométrie annuelle inférieure à la moyenne. Cependant, l'analyse de l'efficacité agronomique de l'eau montre que WUE_{AGB} et WUE_{Yld} sont meilleurs en années subhumides sèches qu'en années subhumides, ce qui suggère

que l'augmentation de la précipitation en années subhumides n'a pas entraîné un gain équivalent de biomasse, réduisant ainsi l'efficacité de l'usage de l'eau par les cultures. Ceci peut s'expliquer par une répartition intra-annuelle de la pluviométrie non favorable à un gain de productivité (pluie hors cycle cultural par exemple) ou par des pertes d'eau significatives via le ruissellement ou la percolation lorsque le sol est à saturation ou lorsque l'intensité des pluies est importante.

Nos résultats montrent aussi une différence de productivité entre les deux cultures, avec une productivité plus importante du blé que de la fève. Ces résultats concordent bien avec d'autres études dans la littérature (Mekki, 2003; Mbava et al., 2020). Angadi et al. (2008) et Mbava et al. (2020) ont trouvé que la productivité est plus importante pour les céréales que pour les légumineuses. Ceci est principalement expliqué par une capacité plus faible des légumineuses, notamment la fève, à convertir le rayonnement absorbé en biomasse comparée aux autres plantes en C3 comme le blé (Sinclair and Horie, 1989). Selon Katerji et al. (2008) et Sinclair (2018), cette capacité de production de biomasse est plus faible chez les plantes contenant un taux élevé de protéines et de lipides parce que la biosynthèse de ces deux types de molécules demande plus d'énergie que la biosynthèse des glucides. La différence entre la productivité du blé et de la fève peut aussi être liée à leur système racinaire. Daryanto et al. (2017) expliquent que les céréales, notamment le blé, sont caractérisées par un système racinaire plus dense et plus profond par rapport aux légumineuses. De plus, moins de 50% des racines du blé se trouvent dans les 20 premiers centimètres du sol contre plus de 70% pour les légumineuses, ce qui permet aux céréales d'aller chercher l'eau plus en profondeur dans le sol.

5. Conclusion

La présente étude a comme objectif principal l'approfondissement des connaissances scientifiques sur l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures, en condition d'agriculture pluviale méditerranéenne, en relief collinaire. Nous avons commencé par une analyse du ruissellement amont qu'une parcelle aval peut recevoir, afin de mieux comprendre sa dynamique temporelle et d'identifier les principaux facteurs influençant cette variable. Nous avons ensuite analysé les simulations réalisées au niveau d'une parcelle aval, recevant de l'eau de ruissellement de l'amont. Pour ce faire, nous avons étudié d'une manière détaillée l'effet de la connectivité sur le fonctionnement des cultures, en réalisant une analyse qualitative et quantitative de la biomasse aérienne sèche et du rendement. Nous avons ensuite

réalisé une étude de sensibilité pour hiérarchiser le poids relatif de chaque facteur d'influence considéré dans la variation des indicateurs et variables agro-hydrologiques étudiés.

L'analyse approfondie de l'effet de la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures a montré que la ré-infiltration des eaux de ruissellement amont peut avoir dans certains cas un effet positif sur la production agricole et dans d'autres cas, plus rares, un effet négatif dû à la saturation de la zone racinaire. L'effet positif de la connectivité inter-parcellaire dépend principalement de la culture, des conditions climatiques et du sol, avec un effet plus marqué sur la fève que sur le blé. Pour le blé, l'effet positif de la connectivité inter-parcellaire est majoritairement observé en années semi-arides, tandis que pour la fève, il est à la fois observé en années semi-arides et en années subhumides sèches. L'amélioration de la production agricole par ré-infiltration des eaux de ruissellement en années subhumides sèches peut être expliquée par la répartition intra-annuelle des pluies.

Les observations quant à la différence de productivité en fonction de la culture et des facteurs sols concordent bien avec la littérature : (1) une productivité plus importante pour les céréales que pour les légumineuses, (2) une productivité plus faible sur sol argileux et (3) une productivité importante sur les sols les plus profonds. L'analyse de sensibilité a montré que la connectivité inter-parcellaire a plus d'effet sur les indicateurs de fonctionnement hydrologique que sur les variables de production et les indicateurs de fonctionnement agronomiques. Bien que la variation de AGB, Yld, WUE_{AGB} et WUE_{Yld} soit significative en fonction des classes du ruissellement amont, ces variables dépendent principalement des facteurs sols.

La présente étude est une première étape dans l'étude de la connectivité inter-parcellaire, en contexte de climat méditerranéen actuel, caractérisé par une alternance d'années sub-humides sèche et d'années semi-aride, avec une dominance d'années sub-humides sèches. Avant de conclure quant à la nécessité de la prise en compte de la connectivité inter-parcellaire dans la modélisation des cultures, il est nécessaire d'approfondir nos résultats (1) en les élargissant à d'autres conditions de culture et de sols, et (2) en les étendant au contexte des climats futurs, qui seront caractérisés, selon les rapports scientifiques, par une diminution importante de la pluviométrie conjuguée à une augmentation des températures et de l'évapotranspiration.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'étudier l'effet de la redistribution des eaux de ruissellement amont sur le fonctionnement des cultures, via la connectivité hydrologique inter-parcellaire, dans un contexte d'agriculture pluviale méditerranéenne en relief collinaire. À notre connaissance, il n'a pas de travaux dans la littérature qui traite cette question, alors que l'impact de cette connectivité sur les processus hydrologiques est abondamment étudié. Pour ce faire, nous nous appuyons sur la modélisation numérique, incluant modélisation du fonctionnement de la végétation et modélisation hydrologique, et ce pour deux raisons. D'une part, elle permet de considérer un large panel de conditions environnementales (cultures, sol, forçage climatique pluriannuel, ruissellement) au sein d'une gamme de validité données. D'autre part, elle permet de décroiser et de hiérarchiser les différents facteurs d'influence. L'approche retenue sous-tend deux objectifs spécifiques à traiter que nous identifions comme prioritaires.

- Le premier objectif spécifique est de s'assurer de notre capacité à simuler le fonctionnement de la végétation cultivée pour les cultures pluviales en contexte méditerranéen collinaire. Il s'agit d'une part d'identifier un modèle adéquat parmi le corpus de modèles existants. Il s'agit ensuite de conduire une évaluation multicritère du modèle retenu pour (1) un ensemble de cultures peu étudiées, (2) un ensemble de combinaisons de sols et de cultures caractéristiques, et (3) des années hydro-climatiques contrastées.
- Le deuxième objectif spécifique est de hiérarchiser les facteurs présumés, dont la connectivité hydrologique, qui influencent au premier ordre le fonctionnement de la végétation cultivée, et d'identifier d'éventuelles situations typiques pour lesquelles l'effet de la connectivité est significatif.

Nous abordons dans la présente conclusion générale les points suivants. Nous rappelons, dans la première partie, les principaux résultats obtenus au cours de cette étude. Nous présentons ensuite les éventuelles faiblesses et les points de vigilance en rapport avec notre approche méthodologique, incluant le plan d'expérimentation numérique et le modèle de culture utilisé. Nous abordons dans la troisième partie nos résultats d'une manière plus large, en discutant (1) l'importance de la prise en compte de la connectivité lors du couplage des modèles et (2) l'organisation spatiale des cultures à l'échelle des paysages comme un levier d'amélioration

pour une production agricole durable. Nous terminons cette conclusion par une présentation des différentes perspectives pour les travaux dans leur ensemble.

Principaux résultats obtenus

Choix et évaluation du modèle de culture

Nous avons recours au modèle de culture de la FAO, AquaCrop. Le choix de ce modèle repose sur ces caractéristiques conceptuelles (formalisme, cultures et variables simulées, types de stress considérés) et techniques (e.g., nombre de paramètres d'entrée, complexité technique). AquaCrop est modèle dans lequel le fonctionnement des cultures est conditionné par la disponibilité de l'eau dans le sol (*water driven model*), ce qui le rend adapté à une utilisation dans des régions où l'eau est le principal facteur limitant la production agricole, comme c'est le cas dans les régions semi-arides et méditerranéennes. Ce modèle parcimonieux est basé sur des formalismes physiques tout en ayant recours à un nombre limité de paramètres, ce qui garantit un bon compromis entre la robustesse et la simplicité.

Notre étude montre qu'AquaCrop simule correctement le fonctionnement de la fève et de l'avoine, deux cultures peu considérées jusqu'à présent avec ce modèle. Elle montre aussi que le modèle est capable (1) de simuler correctement un ensemble de combinaisons de cultures et de sols caractéristiques des agrosystèmes pluviaux méditerranéens en relief collinaire, (2) de simuler simultanément un ensemble de variables décrivant les différents processus agro-hydrologiques et (3) de simuler correctement le fonctionnement des cultures pour un ensemble d'années hydro-climatiques contrastées.

D'une manière générale, les capacités d'AquaCrop à simuler la dynamique végétale et les flux hydriques ne dépendent pas de la classe du sol, mais dépendent principalement de la culture, et elles changent d'une variable à une autre. De plus, AquaCrop simule correctement l'humidité du sol et la production de la biomasse aérienne sèche, et ce pour toutes les cultures et les sols étudiés. En outre, le modèle simule la biomasse aérienne sèche avec une tendance à la surestimation en fin du cycle cultural, ce que nous expliquons par la surestimation du taux de couverture végétale durant la sénescence. Enfin, le ruissellement est mal simulé en début et en fin du cycle cultural, à cause de la présence des fentes de retrait sur des sols argileux.

Étude de la connectivité hydrologique

Le plan d'expérimentation numérique adopté dans ce travail nous permet d'évaluer l'effet de la connectivité sur le fonctionnement des cultures tout en considérant une large gamme de conditions environnementales. Nous considérons (1) une gamme de ruissellement amont variant selon les conditions de la parcelle amont (climat, sol, culture, impluvium), (2) une variabilité de conditions de sol relative à la texture et à la profondeur, (3) des cultures contrastées en matière de couverture végétale (fève peu couvrante et blé couvrant) et de cycle phénologique, et (4) une succession d'années climatiques induisant une large variabilité inter et intra annuelle.

Nos résultats confirment que l'apport d'eau par connectivité inter-parcellaire peut avoir un effet positif sur la production agricole, notamment en climat semi-aride et subhumide sec. L'ampleur de cet effet dépend principalement de la culture (plus important pour la fève), des conditions climatiques et du type du sol. Nous observons aussi que la magnitude du ruissellement amont a peu d'influence, ce qui nécessite une analyse plus fine de l'effet de la connectivité en fonction de seuils de réserve utile. Malgré l'effet que peut avoir la connectivité inter-parcellaire sur le fonctionnement des cultures, nos résultats montrent que la production agricole est principalement influencée par le sol (texture et profondeur) ainsi que par les conditions climatiques.

Nos résultats soulignent aussi que l'effet de la connectivité est étroitement lié à la variabilité intra-annuelle des pluies. Cela suggère qu'il serait plus adéquat de s'appuyer sur une classification des conditions climatiques basée non pas sur le cumul annuel, comme c'est le cas dans ce présent travail, mais sur des cumuls mensuels, voire sur des cumuls périodiques correspondant aux différents stades phénologiques de la culture étudiée.

Éventuelles faiblesses ou prudenances

Le plan d'expérimentation adopté repose sur un cas d'étude simple, basé sur la considération d'un versant constitué de deux parcelles uniquement. Ce plan d'expérimentation nous permet de décroiser plusieurs facteurs d'influence, de réaliser des simulations sur une longue période, et de considérer une large gamme de ruissellement amont. Cependant, quelques faiblesses doivent être soulignées, liées au plan d'expérimentation numérique et au modèle de culture utilisé.

Faiblesse liées au plan d'expérimentation numérique

(1) Rotation culturale : dans le présent travail, nous avons considéré que les parcelles sont cultivées, durant toute la période d'étude, avec la même culture, sans l'introduction d'une rotation culturale. Hors, cette pratique peut avoir une influence sur les quantités d'eau disponibles dans le sol et donc peut modifier l'effet de la connectivité. En effet, l'introduction de plantes peu consommatrices d'eau dans le cycle de succession permet d'avoir plus d'eau dans le sol pour la culture du cycle suivant. Ceci pourrait induire un effet moins important de la connectivité inter-parcellaire notamment durant les années subhumides sèches caractérisées par un début d'année hydrologique particulièrement sec.

(2) Flux sub-surfaciques : en étudiant l'effet de la connectivité hydrologique sur le fonctionnement des cultures, nous nous sommes focalisé uniquement sur les flux d'eau de surface, tout en négligeant les flux sub-surfaciques. Ces derniers peuvent aussi influencer la quantité d'eau dans la zone racinaire et donc le fonctionnement des cultures. De ce fait, la prise en compte de ces flux sub-surfaciques est susceptible de nous amener à revisiter l'ensemble de nos résultats. Cependant, il est important de garder à l'esprit qu'en contexte méditerranéen semi-aride, les écoulements des flux d'eau sont dominés par le ruissellement hortonien, impliquant ainsi des écoulements sub-surfaciques moins importants.

(3) Méthode de détermination du ruissellement : pour étudier l'effet de la connectivité inter-parcellaire, nous avons utilisé des lames d'eau ruisselées simulées par AquaCrop. Ce dernier utilise la méthode du *curve number* (CN) qui est une méthode empirique estimant le ruissellement à un pas de temps journalier. Cette méthode est sujette à de nombreuses critiques, notamment à cause de la non prise en compte de l'intensité et de la durée des pluies dans le calcul du ruissellement. L'utilisation de la méthode du CN n'est pas très adaptée à des régions où les événements pluvieux sont caractérisés par de fortes intensités et où le ruissellement hortonien est souvent dominant (comme dans les régions arides et semi-arides). Une autre source d'incertitude liée à la prédiction du ruissellement par la méthode du CN est la prise en compte des conditions d'humidité du sol durant les jours précédents. En effet, pour une journée avec plusieurs événements pluvieux, les conditions d'humidité du sol peuvent changer au cours de la journée d'un épisode pluvieux à un autre. De ce fait, considérer les conditions d'humidité du sol des jours précédents et non pas celle du jour même ne donne pas une bonne estimation du ruissellement. Ceci confirme qu'une échelle temporelle infra-journalière assure une estimation plus fine du ruissellement.

(4) Extrapolation de nos résultats : considérer des textures, des profondeurs de sol, et des cultures caractéristiques des agrosystèmes pluviaux méditerranéens, ainsi que des données météorologiques décrivant le climat semi-aride méditerranéen avec des variabilités inter- et intra- annuelle importantes, rend nos résultats partiellement extrapolables à d'autres agrosystèmes méditerranéens. Toutefois, il est important de garder à l'esprit que nous avons considéré uniquement deux cultures et quelques conditions édaphiques, ce qui nécessite un approfondissement des résultats en élargissant le panel de conditions culturelles et édaphiques.

Faiblesses liées au modèle de culture utilisé

AquaCrop présente quelques limites dont nous avons discuté en partie dans le chapitre 3. Parmi les limites observées, nous observons une mauvaise représentation de la sénescence précoce de la culture, due probablement à la non prise en compte de l'effet des fortes chaleurs pendant cette phase. Si cette hypothèse est vérifiée via une analyse plus approfondie, l'utilisation d'AquaCrop dans des régions où des pics de chaleurs sont observés, comme c'est le cas à kamech, peut être limitée.

La version V5 d'AquaCrop utilisée dans ce travail est sujette à critique. En effet, cette version semble ne pas être adaptée à des conditions de sécheresse extrême. Pour remédier à ce problème, des modifications sont proposées dans des versions plus récentes du modèle, permettant une meilleure estimation du stress hydrique, ainsi qu'une meilleure simulation du développement précoce de la canopée, de l'expansion racinaire et de la phase de sénescence. Bien que ces cas de sécheresse extrême n'aient pas été rencontrés dans la présente étude, il est conseillé d'utiliser une version plus récente du modèle afin de pouvoir appréhender ces cas.

Points généraux

Comme discuté précédemment, l'effet de la connectivité est plus important en conditions semi-arides. Dans les prochaines années et à cause du changement climatique, l'occurrence de ces conditions va s'accroître, notamment en Méditerranée, nécessitant ainsi une caractérisation plus fine des interactions entre le cycle de l'eau et le cycle de la végétation. Il nous semble donc important de choisir, dans un contexte de modélisation agro-hydrologique, une méthode de couplage permettant la prise en compte des transferts d'eau latéraux, entre les unités du bassin versant, par connectivité hydrologique.

Au regard des discussions dans la littérature quant à l'importance de l'occupation du sol dans la gestion des ressources en eau et en sol (chapitre 1, section 4.1), et au regard des résultats

obtenus dans ce travail, nous pouvons renforcer l'hypothèse que l'organisation spatiale des cultures à l'échelle des paysages est un levier d'amélioration de la production agricole. À titre d'exemple, mettre en place, au sein du bassin versant, les cultures les plus sensibles au stress hydrique en bas de pente permet à ces dernières de bénéficier de l'eau de ruissellement en provenance de l'amont, et donc mieux résister aux conditions de stress hydrique. Ou encore, mettre les cultures les moins ruisselantes en amont permet de minimiser l'érosion hydrique du sol et donc maintenir les profondeurs du sol qui sont un facteur d'influence clé de la production agricole. Toutefois, il est difficile d'affirmer en se basant uniquement sur nos résultats, au vu de la simplicité et des limites de notre plan d'expérimentation.

Perspectives

Nous considérons cette étude comme une première étape dans l'analyse de l'effet de la connectivité hydrologique sur le fonctionnement des cultures, ce qui nécessite de multiples approfondissements. Ces derniers sont de différentes natures.

- Approfondissement de nature statistique : étudier l'effet de la connectivité en réalisant une analyse de sensibilité qui prend en compte les interactions entre les différents facteurs d'influence.
- Approfondissement de nature agronomique : analyser l'effet de la connectivité en considérant une plus grande variété de cultures, et en tenant compte des rotations culturales.
- Approfondissement de nature hydrologique : étudier l'effet de l'apport d'eau par flux subsurfaciques sur la production agricole, et caractériser plus finement le processus de ruissellement. Pour ce second point, nous avons montré que le *curve number* simule mal le ruissellement à l'échelle journalière, et plusieurs pistes d'amélioration sont envisageables sur les points spécifiques comme discuté dans la littérature (e.g., prise en compte de l'intensité de la pluie, prise en compte de la phénologie de la culture). Cependant, nombre de travaux suggèrent un changement d'échelle temporelle, sachant que la simulation du ruissellement à un pas de temps infra-journalier est plus réaliste, ce qui nécessite le couplage d'AquaCrop avec un modèle hydrologique (e.g., MHYDAS).
- Approfondissement de nature agro-hydrologique : étendre la présente étude à l'extension spatiale du bassin versant. Cela qui requiert de s'appuyer sur (1) la segmentation de l'espace incluant parcelles agricoles et réseau hydrographique, et (2) la modélisation agro-hydrologique impliquant le couplage précité (AquaCrop et MHYDAS). Dans ce cas, nous

pourrons appréhender la complexité des résultats obtenus sur l'extension du bassin versant en s'appuyant sur les résultats obtenus à l'échelle locale dans le cadre de la présente étude.

- Approfondissement de nature socio-économique : étudier les effets antagonistes de la connectivité hydrologique vis-à-vis de services écosystémiques autres que la production agricole (production d'eau bleue par la recharge des nappes et par les oueds). Il s'agit, autrement dit, de comprendre si l'amélioration de la production agricole par la ré-infiltration des eaux de ruissellement se fait au détriment de la production d'eau bleue (recharge des nappes, eau dans le réseau hydrographique) à l'échelle du bassin versant.
- Approfondissement dans un contexte de climat futur : étudier l'effet de la connectivité hydrologique sur le fonctionnement des cultures dans un contexte de climat futur, caractérisé par une baisse de la pluviométrie, une augmentation de l'évapotranspiration et des vagues de chaleurs de plus en plus extrêmes.

Annexes

Annexe A : Matériel supplémentaire de l'article présenté dans le chapitre 3

Multicriteria evaluation of the AquaCrop crop model in a hilly rainfed Mediterranean

Dhouib Mariem, Zitouna-Chebbi Rim, Prévot Laurent, Molénat Jérôme, Mekki Insaf, Jacob
Frédéric

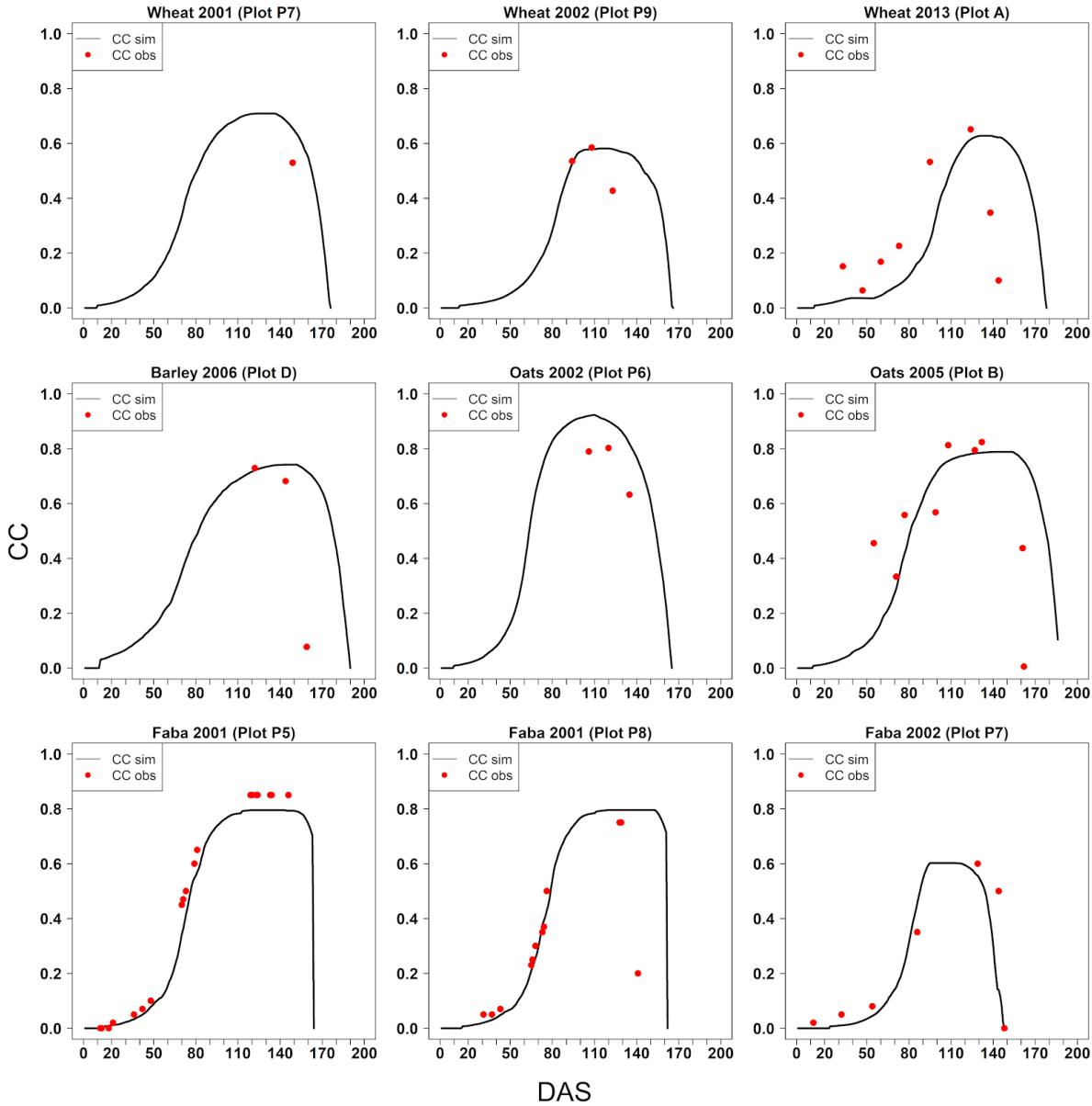


Figure A.1: Temporal evolution of canopy cover (CC) for each dataset when available. The red points correspond to the ground-based observations, and the black curves correspond to the AquaCrop simulations. DAS stands for Day after Sowing.

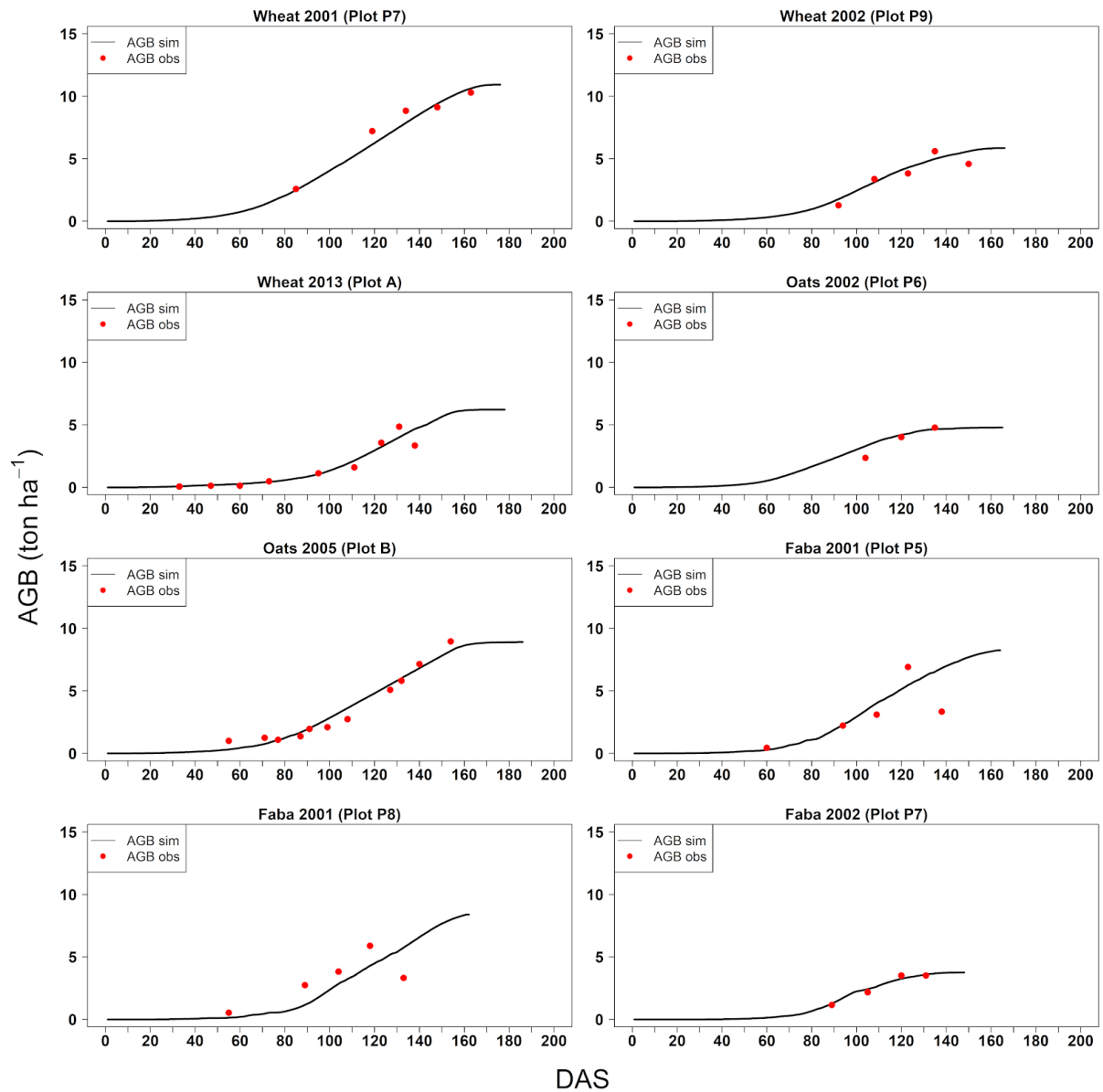


Figure A.2: Temporal evolution of aboveground biomass (AGB) for each dataset when available. The red points correspond to observations and the black curve corresponds to AquaCrop simulations. DAS stands for Day after Sowing.

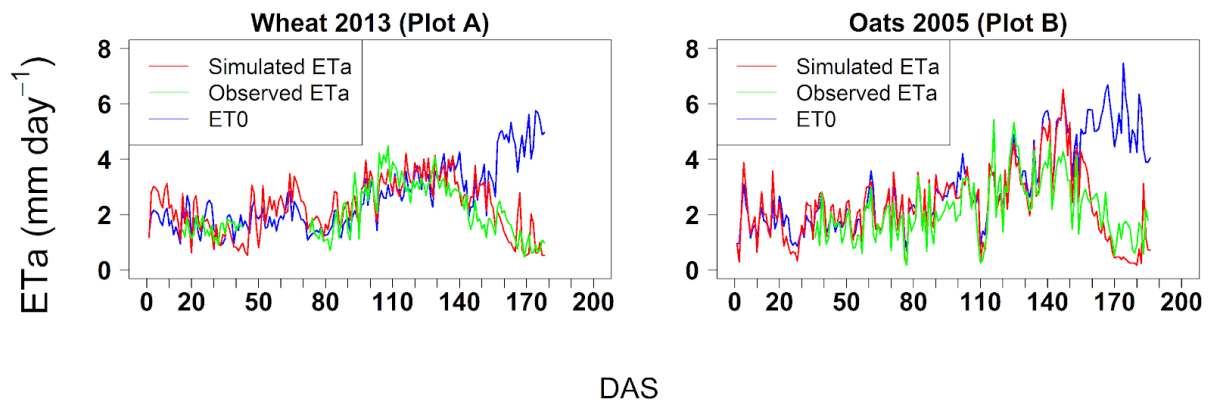


Figure A.3: Temporal evolution of actual evapotranspiration (ETa) for each dataset when available. The red curve corresponds to ETa simulated by AquaCrop, the green curve corresponds to ETa measured in-situ by eddy covariance and the blue curve corresponds to reference evapotranspiration ET0. DAS stands for Day after Sowing.

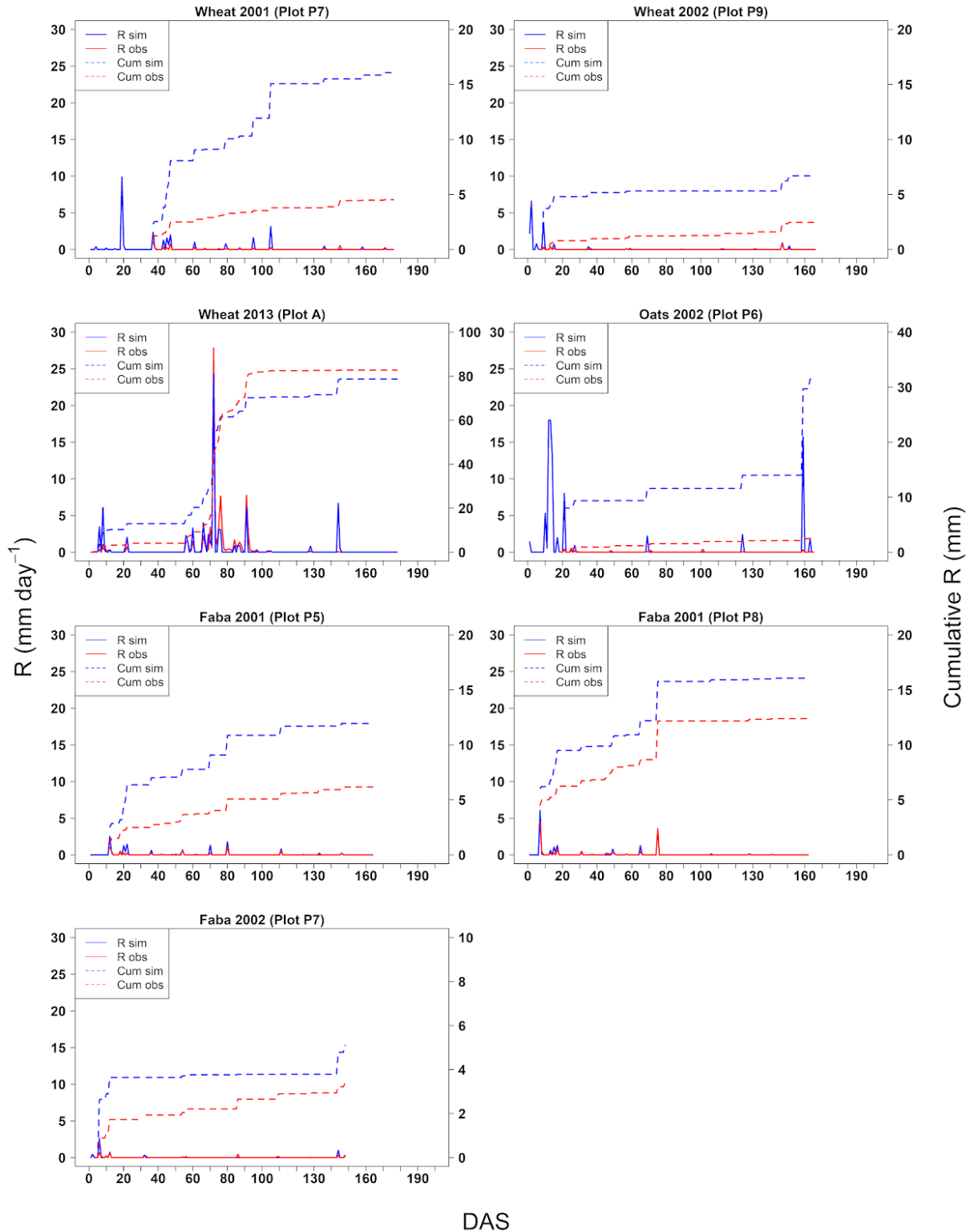


Figure A.4: Temporal evolution of runoff (R) for each dataset when available. The solid lines represent the temporal evolution of R . The dashed lines represent R accumulation. The blue colour indicates the simulations and the red colour indicates the observations. DAS stands for Day after Sowing. Y-Scales are chosen for both reading and intercomparing.

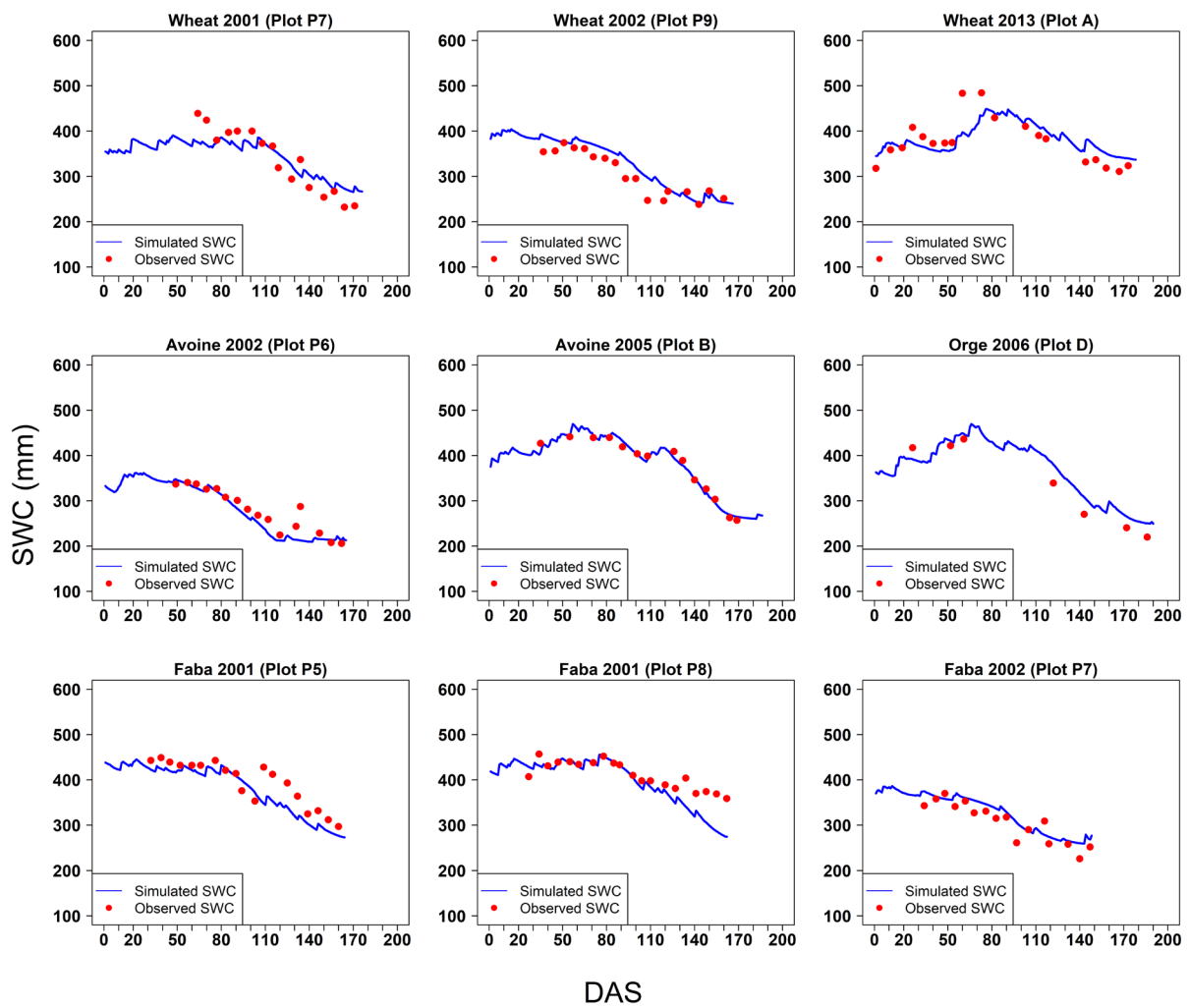


Figure A.5: Temporal evolution of soil water content (SWC) over 1 m depth. The red points correspond to SWC observations, and the blue curves correspond to the AquaCrop simulations. DAS stands for Day after Sowing.

Annexe B : Matériel supplémentaire du chapitre 4

Tableau B.1 : Classification de l'aridité selon l'indice de Martonne et l'indice de FAO.

Indice de Martonne		Indice de FAO	
AIM	Classe	AIF	Classe
		$AIF \leq 0.03$	Désert
$0 < AIM \leq 5$	Hyperaride	$0.03 < AIF \leq 0.05$	Hyperaride
$5 < AIM \leq 10$	Aride	$0.05 < AIF \leq 0.2$	Aride
$10 < AIM \leq 20$	Semi-aride	$0.2 < AIF \leq 0.5$	Semi-aride
$20 < AIM \leq 30$	Semi-humide	$0.5 < AIF \leq 0.65$	Subhumide sec
		$0.65 < AIF \leq 0.75$	Subhumide
$AIM > 30$	Humide	$AIF > 0.75$	Humide

Le calcul de AIM et AIF sur notre jeu de données (Figure D.1) montre que pour les années avec des cumuls annuels de pluie supérieurs ou égaux à la moyenne, les deux méthodes donnent des résultats semblables. Cependant, pour les années 2001, 2008, 2012, 2015 et 2017 caractérisées par des cumuls de pluies légèrement inférieurs à la moyenne (écart à la moyenne entre 24 mm et 54 mm), la classification des deux méthodes est différente. La méthode de Martonne classe ces années en semi-humide tandis que la méthode de la FAO les classe en semi-aride.

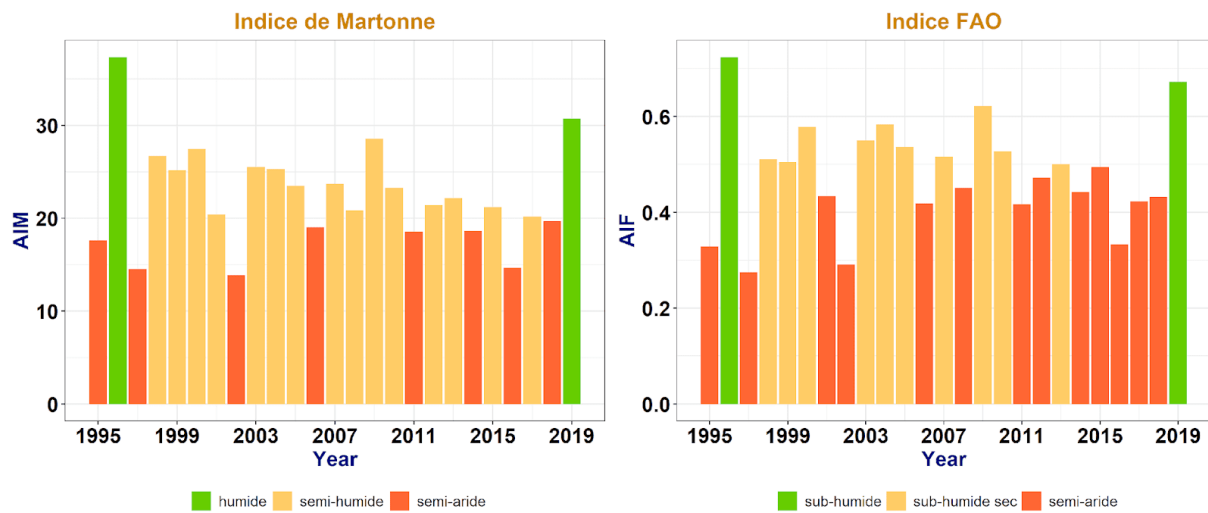


Figure B.1 : Classification des années selon l'indice d'aridité de Martonne (figure de gauche) et l'indice de FAO (figure de droite). Les années sont des années hydrologiques, de septembre année [n-1] à août année [n].

Tableau B.2 : Paramètres culturaux conservatifs et non conservatifs, utilisé pour les simulations AquaCrop.

	Wheat	Faba bean
Conservative parameters		
Base temperature (°C)	0	5.5
Cutoff temperature (°C)	26	30
Canopy cover per seedling at 90% emergence (CC ₀) (cm ²)	1.5	5
Canopy growth coefficient (CGC) (in fraction CC per GDD)	0.0052	0.0105
Maximum canopy cover (CC _x) in fraction soil cover	0.99	0.8
Crop coefficient for transpiration at CC = 100%	1.1	1.1
Decline in crop coefficient after reaching CC _x (%/day)	0.15	0.15
Canopy decline coefficient (CDC) (in fraction per GDD)	0.004	0.008
Water productivity normalized for ET ₀ and CO ₂ (WP*) (g/m ²)	13.4	13
Leaf growth threshold (Pupper)	0.2	0.25
Leaf growth threshold (Pflower)	0.65	0.6
Leaf growth stress coefficient curve shape	5	3
Stomatal conductance threshold (Pupper)	0.65	0.6
Stomata stress coefficient curve shape	2.5	3
Senescence stress coefficient (Pupper)	0.7	0.75
Senescence stress s coefficient curve shape	2.5	3
Non conservative parameters		
GDD from sowing to emergence	140	122
GDD from sowing to maximum rooting depth	1670	741
GDD from sowing to start senescence	1861	1286
GDD from sowing to maturity (length of crop cycle)	2777	1411
GDD from sowing to flowering	1543	879
Length of the flowering stage (GDD)	189	128
GDD building up of harvest index during yield formation	980	495
Reference harvest index (HI ₀) (%)	45	30

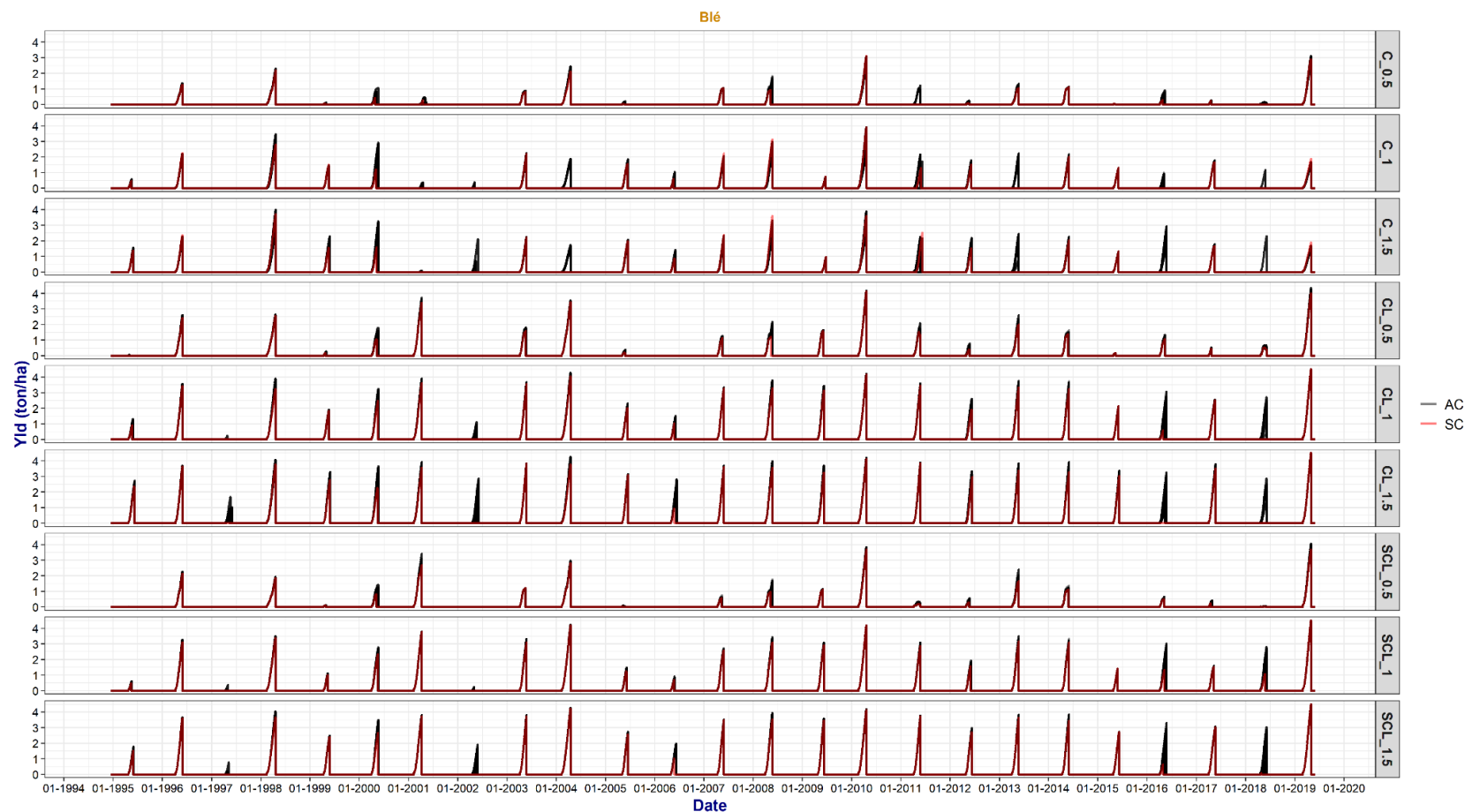


Figure B.2 : Évolution temporelle du rendement (Yld) du blé, sur 25 années de simulation, sans connectivité (SC, courbe rouge) et avec connectivité (AC, courbes noires). Chaque ligne correspond à une combinaison de texture et de profondeur du sol pour la parcelle Av. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement.

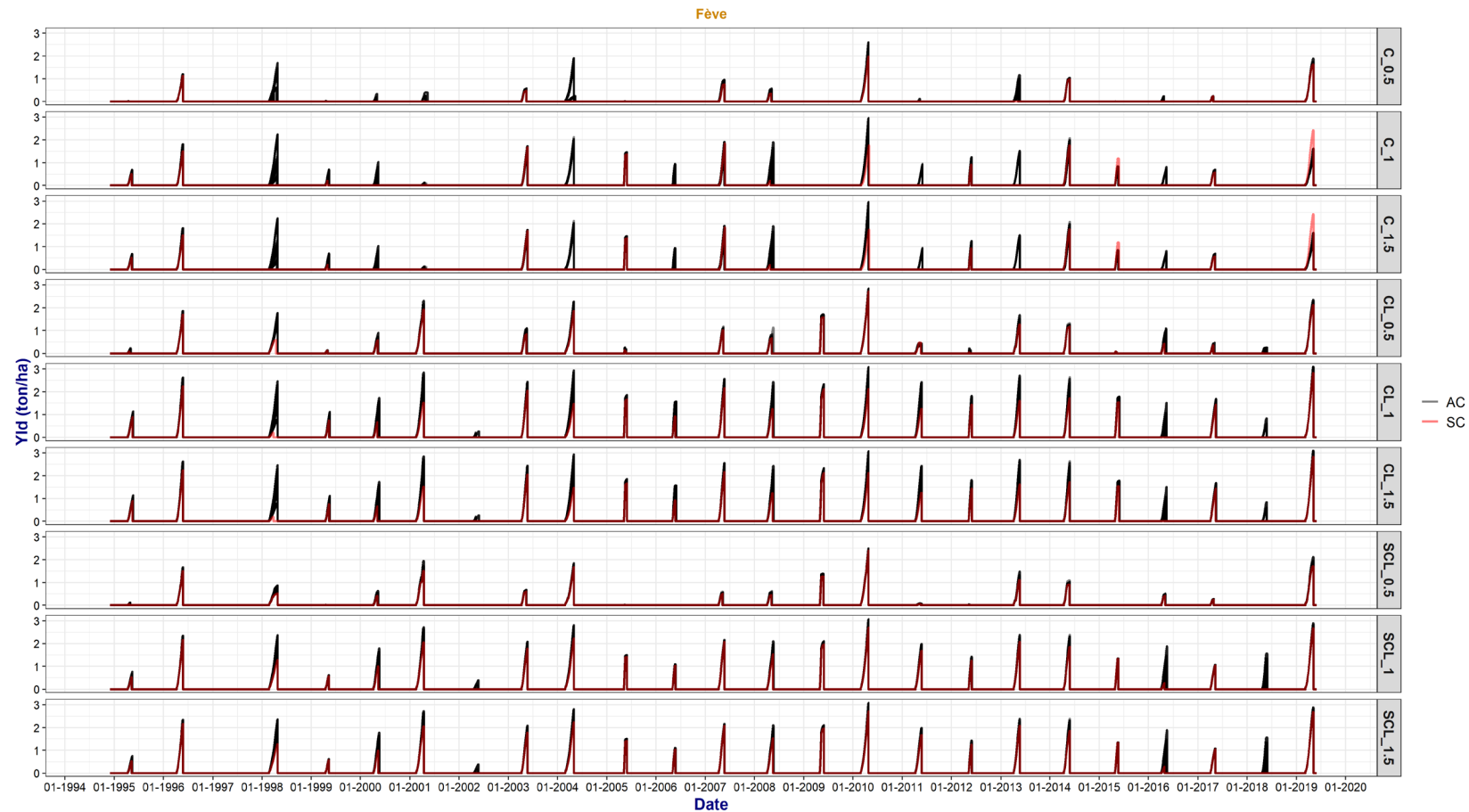


Figure B.3 : Évolution temporelle du rendement (*Yld*) de la fève, sur 25 années de simulation, sans connectivité (SC, courbe rouge) et avec connectivité (AC, courbes noires). Chaque ligne correspond à une combinaison de texture et de profondeur du sol pour la parcelle Av. C, CL et SCL correspondent aux textures Clay, Clay-Loam et Sandy-Clay-Loam, respectivement. Les labels "_0.5", "_1" et "_1.5" correspondent aux profondeurs 0.5 m, 1 m et 1.5 m, respectivement.

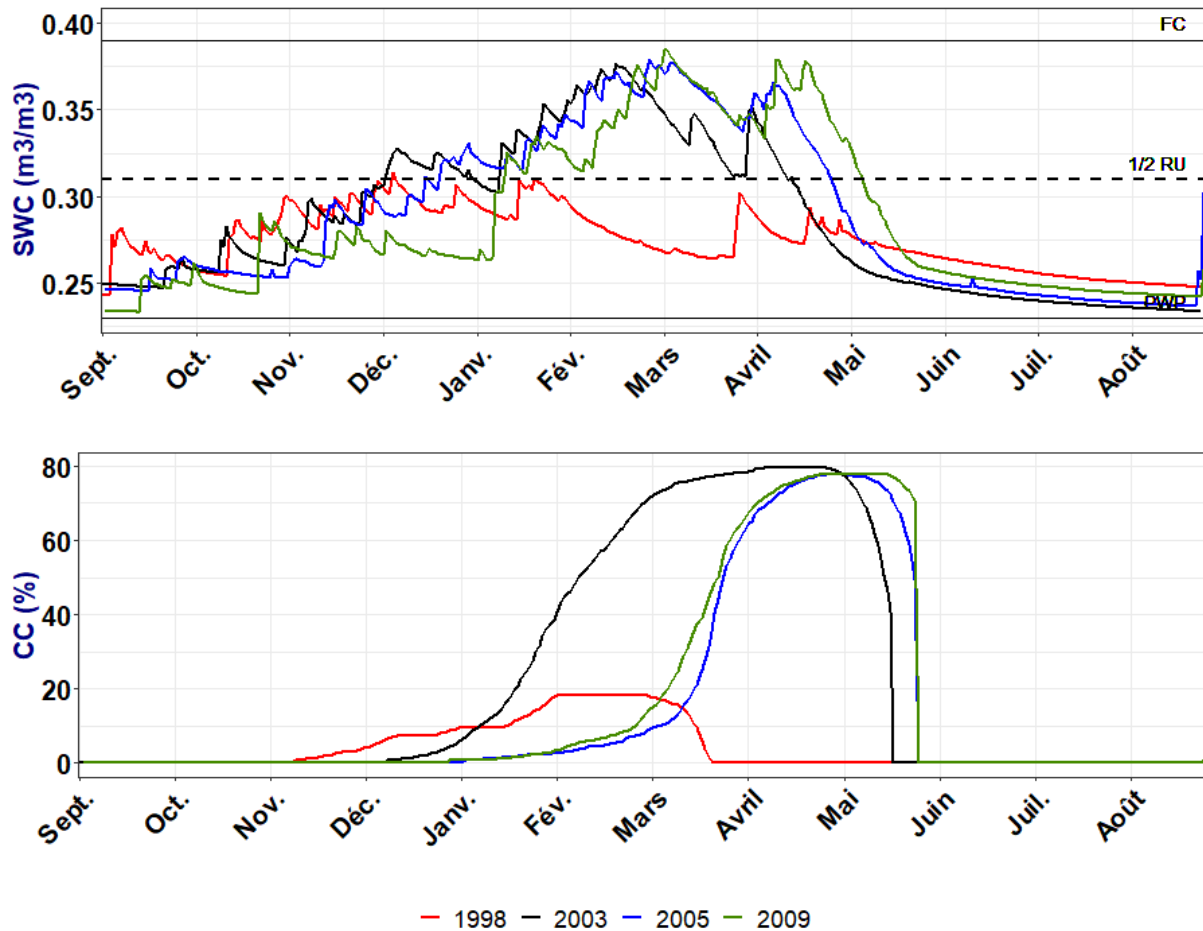


Figure B.4 : Comparaison de l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC) et du taux de couverture végétale (CC) d'une simulation en SC, en 1998 avec celles des années 2005 et 2009, pour la fève, semée sur un sol argileux limoneux de 1 m de profondeur. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent, l'humidité du sol à la capacité au champ. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.

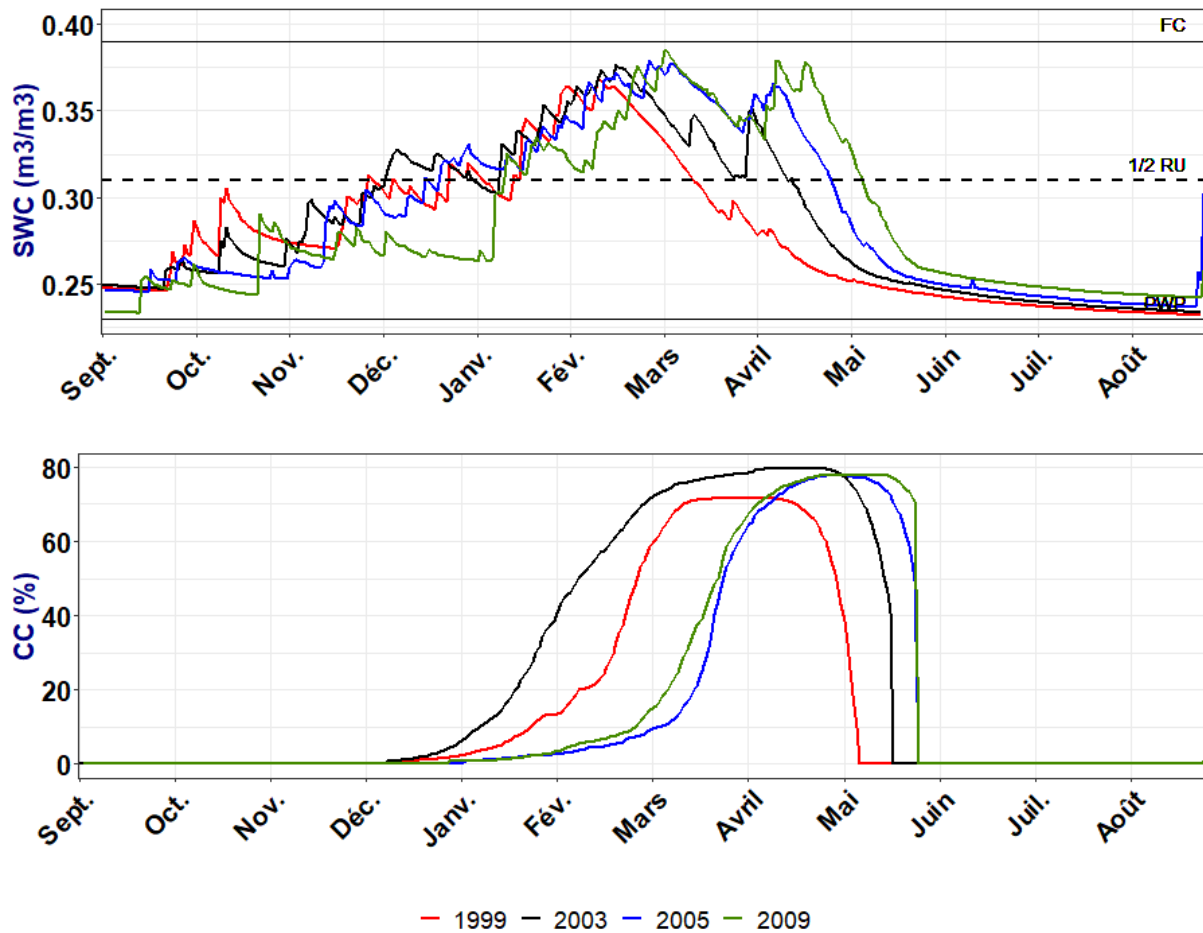


Figure B.5 : Comparaison de l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC) et du taux de couverture végétale (CC) d'une simulation en SC, en 1999 avec celles des années 2005 et 2009, pour la fève, semée sur un sol argileux limoneux de 1 m de profondeur. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent, l'humidité du sol à la capacité au champ. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.

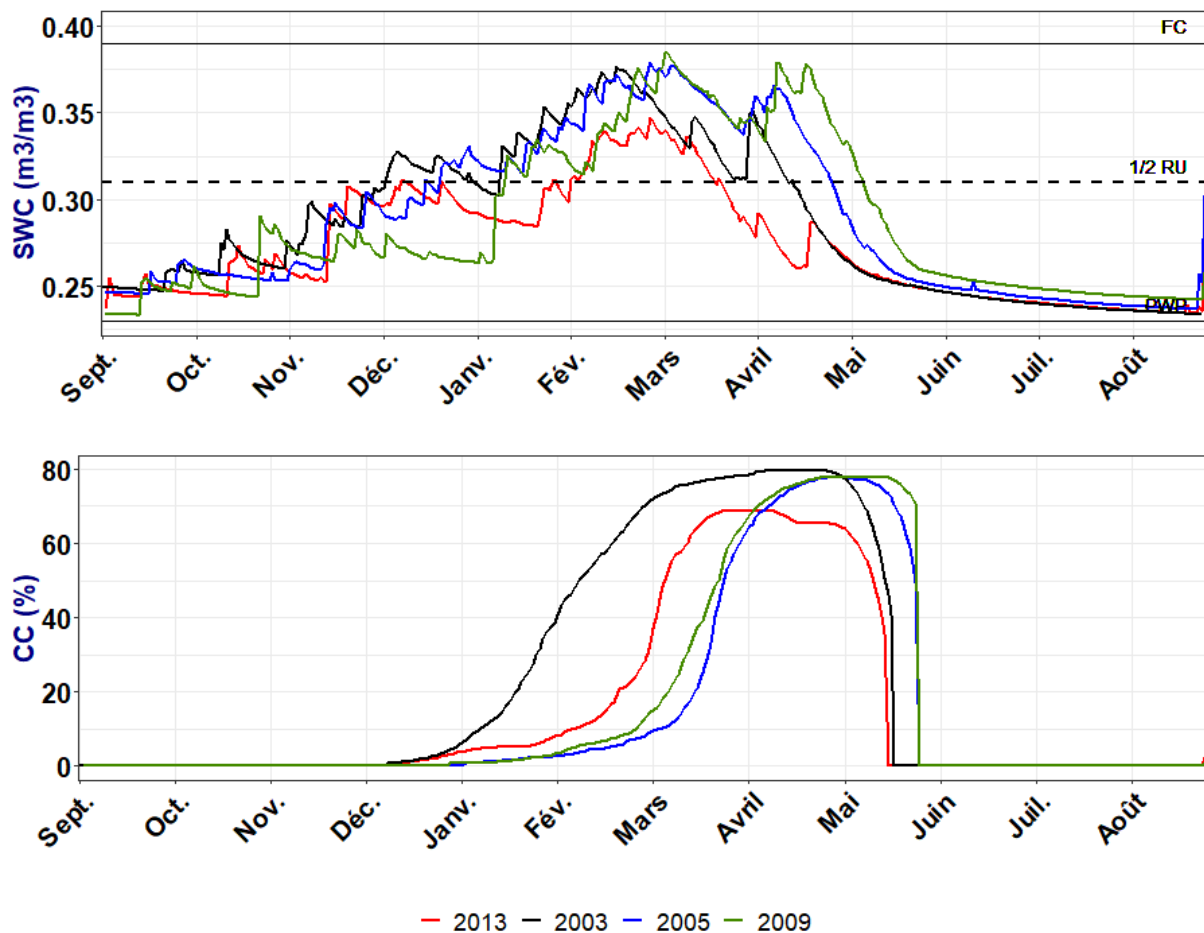


Figure B.6 : Comparaison de l'évolution temporelle de l'humidité du sol (SWC) et du taux de couverture végétale (CC) d'une simulation en SC, en 2013 avec celles des années 2005 et 2009, pour la fève, semée sur un sol argileux limoneux de 1 m de profondeur. PWP et FC correspondent à l'humidité du sol au point de flétrissement permanent, l'humidité du sol à la capacité au champ. $\frac{1}{2}$ RU correspond à l'humidité du sol à la moitié du réservoir utile.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abd-Elmabod, S.K., Jordán, A., Fleskens, L., Phillips, J.D., Muñoz-Rojas, M., van der Ploeg, M., Anaya-Romero, M., El-Ashry, S., de la Rosa, D., 2017. Chapter 7 - Modeling Agricultural Suitability Along Soil Transects Under Current Conditions and Improved Scenario of Soil Factors, in: Pereira, P., Brevik, E.C., Muñoz-Rojas, M., Miller, B.A. (Eds.), *Soil Mapping and Process Modeling for Sustainable Land Use Management*. Elsevier, pp. 193–219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805200-6.00007-4>
- Abi Saab, M.T., El Alam, R., Jomaa, I., Skaf, S., Fahed, S., Albrizio, R., Todorovic, M., 2021. Coupling Remote Sensing Data and AquaCrop Model for Simulation of Winter Wheat Growth under Rainfed and Irrigated Conditions in a Mediterranean Environment. *Agronomy* 11, 2265. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112265>
- Abi Saab, M.T., Todorovic, M., Albrizio, R., 2015. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models? *Agricultural Water Management, Agricultural Water Management: Priorities and Challenges* 147, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.001>
- Abrahamsen, P., Hansen, S., 2000. Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling & Software* 15, 313–330. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00003-7)
- Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanutrecht, E., Geerts, S., Garcia-Vila, M., Deckers, S., 2012. Sowing strategies for barley (*HORDEUM VULGARE* L.) based on modelled yield response to water with AQUACROP. *Ex. Agric.* 48, 252–271. <https://doi.org/10.1017/S0014479711001190>
- Aguilera, E., Díaz-Gaona, C., García-Laureano, R., Reyes-Palomo, C., Guzmán, G.I., Ortolani, L., Sánchez-Rodríguez, M., Rodríguez-Estévez, V., 2020. Agroecology for adaptation to climate change and resource depletion in the Mediterranean region. A review. *Agricultural Systems* 181, 102809. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102809>
- Ahmadi, S.H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A.A., Sepaskhah, A.R., 2015. Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resour Manage* 29, 2837–2853. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>
- Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., Ort, D.R., Long, S.P., 2008. FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply.
- Ainsworth, E.A., Long, S.P., 2004. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂: Tansley review. *New Phytologist* 165, 351–372. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x>
- Al-Ajlouni, Z., Al-Abdallat, A., Al-Ghzawi, A., Ayad, J., Abu Elenein, J., Al-Quraan, N., Baenziger, P., 2016. Impact of Pre-Anthesis Water Deficit on Yield and Yield

- Components in Barley (*Hordeum vulgare* L.) Plants Grown under Controlled Conditions. *Agronomy* 6, 33. <https://doi.org/10.3390/agronomy6020033>
- Alaya, I., Masmoudi, M.M., Jacob, F., Ben Mechlia, N., 2019. Up-scaling of crop productivity estimations using the AquaCrop model and GIS-based operations. *Arabian Journal of Geosciences* 12. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4588-5>
- Albergel, J., Nasri, S., 2001. Hydromed : rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen.
- Albergel, J., Nasri, S., Lamachère, J.M., 2004. Programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. *rseau* 17, 133–151. <https://doi.org/10.7202/705526ar>
- Ali, G., Oswald, C., Spence, C., Wellen, C., 2018. The T-TEL Method for Assessing Water, Sediment, and Chemical Connectivity. *Water Resour. Res.* 54, 634–662. <https://doi.org/10.1002/2017WR020707>
- Ali, G.A., Roy, A.G., 2009. Revisiting Hydrologic Sampling Strategies for an Accurate Assessment of Hydrologic Connectivity in Humid Temperate Systems: Hydrologic sampling for connectivity assessment. *Geography Compass* 3, 350–374. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00180.x>
- Ali, M.H., Talukder, M.S.U., 2008. Increasing water productivity in crop production—A synthesis. *Agricultural Water Management* 95, 1201–1213. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.008>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 15.
- Alvey, S., Bagayoko, M., Neumann, G., Buerkert, A., 2001. Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils. *Plant and Soil* 231, 45–54. <https://doi.org/10.1023/A:1010386800937>
- Ambroise, B., 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant, *H*G*A*. ed. Bucarest.
- Ameli, A.A., Creed, I.F., 2017. Quantifying hydrologic connectivity of wetlands to surface water systems. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 1791–1808. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1791-2017>
- Ammar, A., Riksen, M., Ouessar, M., Ritsema, C., 2016. Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review. *International Soil and Water Conservation Research* 4, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001>
- Anctil, F., Rousselle, J., Lauzon, N., 2012. Hydrologie: Cheminement de l'eau, 2e édition. ed. Presses Polytechnique de Montréal.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., Rahnama, A., 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated

- wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* 100, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Angadi, S.V., McConkey, B.G., Cutforth, H.W., Miller, P.R., Ulrich, D., Selles, F., Volkmar, K.M., Entz, M.H., Brandt, S.A., 2008. Adaptation of alternative pulse and oilseed crops to the semiarid Canadian Prairie: Seed yield and water use efficiency. *Can. J. Plant Sci.* 88, 425–438. <https://doi.org/10.4141/CJPS07078>
- Angulo, C., Gaiser, T., Rötter, R.P., Børgesen, C.D., Hlavinka, P., Trnka, M., Ewert, F., 2014. ‘Fingerprints’ of four crop models as affected by soil inputdata aggregation.
- Antle, J.M., Capalbo, S.M., Elliott, E.T., Hunt, H.W., Mooney, S., Paustian, K.H., 2001. Research Needs for Understanding and Predicting the Behavior of Managed Ecosystems: Lessons from the Study of Agroecosystems. *Ecosystems* 4, 723–735. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0041-0>
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., Dejene, T., 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management* 97, 1838–1846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.021>
- Archambeaud, M., Thomas, F., 2016. Les sols agricoles: comprendre, observer, diagnostiquer, L’agroécologie en pratique. Éditions France agricole, Paris.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34, 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.-L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., Hatfield, J., Hoek, S., Izaurralde, C., Jongschaap, R., Kemanian, A.R., Kersebaum, K.C., Kim, S.-H., Kumar, N.S., Makowski, D., Müller, C., Nendel, C., Priesack, E., Pravia, M.V., Sau, F., Shcherbak, I., Tao, F., Teixeira, E., Timlin, D., Waha, K., 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Glob Change Biol* 20, 2301–2320. <https://doi.org/10.1111/gcb.12520>
- Belhouchette, H., Breaudeau, E., Hachicha, M., Donatelli, M., Mohtar, R.H., Wery, J., 2008. Integrating spatial soil organization data with a regional agricultural management simulation model: a case study in Northern Tunisia. *Transactions of the ASABE* 51, 1099–1109.
- Ben Mechlia, N., Mekki, I., Zante, P., 1999. Spatialisation de l’activité agricole et de l’occupation du sol dans une région au relief accidenté 8.
- Benaouda, H., Bourarach, jEl H., Vadon, B., 2015. Produire mieux en s’adaptant au changement climatique Des Groupements Paysans au Maghreb s’engagent dans des agro-systèmes innovants.

- Bergeret, P., Ourabah Haddad, N., Castaneda Sepúlveda, R., 2016. LE GASPILLAGE DES SAVOIR-FAIRE ET DES RESSOURCES HUMAINES, in: *Mediterra: Zéro Gaspillage En Méditerranée : Ressources Naturelles, Alimentations et Connaissances*.
- Bergström, S., 1995. The HBV model. *Computer models of watershed hydrology*. 443–476.
- Besbes, M., Chahed, J., Hamdane, A., 2014. Sécurité hydrique de la Tunisie: gérer l'eau en conditions de pénuries, Histoire et perspectives méditerranéennes. l'Harmattan, Paris.
- Bhattacharya, A., 2019. Chapter 3 - Water-Use Efficiency Under Changing Climatic Conditions, in: Bhattacharya, A. (Ed.), *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*. Academic Press, pp. 111–180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816209-5.00003-9>
- Biazin, B., Stroosnijder, L., 2012. To tie or not to tie ridges for water conservation in Rift Valley drylands of Ethiopia. *Soil and Tillage Research* 124, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.006>
- Birch, A.N.E., Griffiths, B.S., Caul, S., Thompson, J., Heckmann, L.H., Krogh, P.H., Cortet, J., 2007. The role of laboratory, glasshouse and field scale experiments in understanding the interactions between genetically modified crops and soil ecosystems: A review of the ECOGEN project. *Pedobiologia, SOIL ECOLOGICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF GENETICALLY MODIFIED CROPS - ECOGEN* 51, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2007.04.008>
- Bird, D.N., Benabdallah, S., Gouda, N., Hummel, F., Koeberl, J., La Jeunesse, I., Meyer, S., Pretenthaler, F., Soddu, A., Woess-Gallasch, S., 2016. Modelling climate change impacts on and adaptation strategies for agriculture in Sardinia and Tunisia using AquaCrop and value-at-risk. *Science of The Total Environment, Special Issue on Climate Change, Water and Security in the Mediterranean* 543, 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.035>
- Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes* 9, 251–290. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305>
- Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. Marcel Dekker.
- Boudhina, N., Masmoudi, M.M., Alaya, I., Jacob, F., Ben Mechlia, N., 2019. Use of AquaCrop model for estimating crop evapotranspiration and biomass production in hilly topography. *Arab J Geosci* 12, 259. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4434-9>
- Boudhina, N., Masmoudi, M.M., Ben Mechlia, N., Zitouna, R., Mekki, I., Prévot, L., Jacob, F., 2017a. Evapotranspiration of Wheat in a Hilly Topography: Results from Measurements Using a Set of Eddy Covariance Stations, in: Ouessar, M., Gabriels, D., Tsunekawa, A., Evett, S. (Eds.), *Water and Land Security in Drylands: Response to Climate Change*. Springer International Publishing, Cham, pp. 67–76. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54021-4_7
- Boudhina, N., Masmoudi, M.M., Jacob, F., Prévot, L., Zitouna, R., Mekki, I., Mechlia, N.B., 2017b. Measuring crop evapotranspiration over hilly areas. Presented at the 1. Euro-

- Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI), Springer International Publishing, p. 3. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_266
- Boudhina, N., Zitouna-Chebba, R., Mekki, I., Jacob, F., Ben Mechlia, N., Masmoudi, M., Prévot, L., 2018. Evaluating four gap-filling methods for eddy covariance measurements of evapotranspiration over hilly crop fields. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 7, 151–167. <https://doi.org/10.5194/gi-7-151-2018>
- Boughton, W.C., 1989. A review of the USDA SCS curve number method. *Soil Res.* 27, 511–523. <https://doi.org/10.1071/sr9890511>
- Boukari, M., 2017. Modélisation des variables biophysiques des cultures pluviales dans le bassin versant de Lebna par SENTINEL2 en vue de l'estimation de la productivité de l'eau (Mémoire de Master). Ecole doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur (STI), Tunisie.
- Bouteffeha, M., Dages, C., Bouhlila, R., Molenat, J., 2015. A water balance approach for quantifying subsurface exchange fluxes and associated errors in hill reservoirs in semiarid regions. *Hydrological Processes* 29, 1861–1872. <https://doi.org/10.1002/hyp.10308>
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J.P., H nault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)
- Brooks, R.J., Tobias, A.M., 1996. Choosing the Best Model: Level of Detail, Complexity, and Model Performance.
- Brun, M., Blanc, P., Otto, H., 2016. PERSPECTIVE GLOBALE DES RESSOURCES NATURELLES, in: *Mediterra: Z ro Gaspillage En M diterran e: Ressources Naturelles, Alimentations et Connaissances*.
- Buda, A.R., 2013. 7.7 Surface-Runoff Generation and Forms of Overland Flow, in: Shroder, J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, pp. 73–84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00151-2>
- Cadisch, G., Rowe, E.C., Suprayogo, D., Noordwijk, M. van, 2004. Safety-nets and filter functions of tropical agroforestry systems. *Proceedings of 12th N workshop Controlling N flows and losses, Devon, 21-24 September 2004* 406–414.
- Calvet, R., 2013. *Le sol*, 2e  d. ed, Agriproduction.  d. "France agricole," Paris.
- Calvi o, P.A., Andrade, F.H., Sadras, V.O., 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agronomy Journal* 95, 275–281. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.2750>
- Cassel, D.K., Nielsen, D.R., 1986. Field Capacity and Available Water Capacity, in: Klute, A. (Ed.), *SSSA Book Series*. Soil Science Society of America, American Society of

- Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 901–926.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c36>
- Castaneda-Vera, A., Leffelaar, P.A., Álvaro-Fuentes, J., Cantero-Martínez, C., 2015. Selecting crop models for decision making in wheat insurance.
- Chahinian, N., 2004. Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole (phdthesis). Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques).
- Chen, L., Sela, S., Svoray, T., Assouline, S., 2016. Scale dependence of Hortonian rainfall-runoff processes in a semiarid environment: SCALE DEPENDENCE OF SEMIARID RAINFALL-RUNOFF PROCESSES. *Water Resour. Res.* 52, 5149–5166.
<https://doi.org/10.1002/2015WR018315>
- Chen, T., Shu, J., Han, L., Tian, G., Yang, G., Lv, J., 2022. Modeling the effects of topography and slope gradient of an artificially formed slope on runoff, sediment yield, water and soil loss of sandy soil. *CATENA* 212, 106060.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106060>
- Chen, X., Cheng, Q., Chen, Y.D., Smettem, K., Xu, C.-Y., 2010. Simulating the integrated effects of topography and soil properties on runoff generation in hilly forested catchments, South China. *Hydrol. Process.* 24, 714–725.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7509>
- Cherif, S., Doblas-Miranda, E., Lionello, P., Borrego, C., Giorgi, F., Iglesias, A., Jebari, S., Mahmoudi, E., Moriondo, M., Pringault, O., Rilov, G., Somot, S., Tsikliras, A., Vilà, M., Zittis, G., 2020. First Mediterranean Assessment Report - Chapter 2: Drivers of Change. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7100601>
- Claverie, M., Demarez, V., Duchemin, B., Hagolle, O., Keravec, P., Marciel, B., Ceschia, E., Dejoux, J.F., Dedieu, G., 2009. Spatialization of crop leaf area index and biomass by combining a simple crop model SAFY and high spatial and temporal resolutions remote sensing data, in: 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Presented at the 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, p. III-478-III-481. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5418296>
- Coleman, D.C., Crossley, D.A., Hendrix, P.F., 2004. Fundamentals of soil ecology, 2nd ed. ed. Elsevier Academic Press, Amsterdam ; Boston.
- Constantin, J., Picheny, V., Nassar, L.H., Bergez, J.-E., 2020. A method to assess the impact of soil available water capacity uncertainty on crop models with a tipping-bucket approach. *European Journal of Soil Science* 71, 369–381.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12878>
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., Therond, O., 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology* 206, 55–68.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.011>

- Corbane, C., Raclot, D., Jacob, F., Albergel, J., Andrieux, P., 2008. Remote sensing of soil surface characteristics from a multiscale classification approach. *Catena* 75, 308–318.
- Corbeels, M., Chirat, G., Messad, S., Thierfelder, C., 2016. Performance and sensitivity of the DSSAT crop growth model in simulating maize yield under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy* 76, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.001>
- Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., García de Cortázar-Atauri, I., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K.S., Le Bas, C., Justes, E., Léonard, J., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environmental Modelling & Software* 64, 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024>
- Coulouma, G., Ciampalini, R., Annabi, M., Bahri, H., Raclot, D., 2017. Synthèse de la prospection pédologique sur le bassin versant de kamech dans le cadre du projet MASCC (Compte rendu). UMR LISAH, Montpellier.
- Cousin, I., Buis, S., Lagacherie, P., Doussan, C., Le Bas, C., Guérif, M., 2022. Available water capacity from a multidisciplinary and multiscale viewpoint. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 46. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00774-8>
- Cruziat, P., Lagouarde, J.-P., 1995. actes de l'école chercheurs INRA en bioclimatologie. Tome 1 : de la plante au couvert végétal. Département de bioclimatologie INRA.
- Cusicanqui, J., Dillen, K., Garcia, M., Geerts, S., Raes, D., Mathijs, E., 2013. Economic assessment at farm level of the implementation of deficit irrigation for quinoa production in the Southern Bolivian Altiplano. *Span J Agric Res* 11, 894. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013114-4097>
- Daccache, A., Elbana, M.A., Fouial, A., Karajeh, R., Lamaddalena, N., Saliba, R., Scardigno, A., Steduto, P., Todorovic, M., 2016. Gestion des ressources en eau, in: *Mediterra: zéro gaspillage en Méditerranée : ressources naturelles, alimentations et connaissances*. pp. 71–93.
- Dakhlaoui, H., Seibert, J., Hakala, K., 2020. Sensitivity of discharge projections to potential evapotranspiration estimation in Northern Tunisia. *Reg Environ Change* 20, 34. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01615-8>
- Dalgaard, T., Hutchings, N.J., Porter, J.R., 2003. Agroecology, scaling and interdisciplinarity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 100, 39–51. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00152-X)
- Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P.-A., 2017. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management* 179, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.022>
- de Martonne, E., 1927. Regions of Interior-Basin Drainage. *Geographical Review* 17, 397–414. <https://doi.org/10.2307/208323>

- de San Celedonio, R.P., Abeledo, L.G., Mantese, A.I., Miralles, D.J., 2017. Differential root and shoot biomass recovery in wheat and barley with transient waterlogging during preflowering. *Plant Soil* 417, 481–498. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3274-1>
- de Wit, A., Boogaard, H., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., van Kraalingen, D., Supit, I., van der Wijngaart, R., van Diepen, K., 2019. 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agricultural Systems* 168, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.018>
- Deb, P., Shrestha, S., Babel, M.S., 2015. Forecasting climate change impacts and evaluation of adaptation options for maize cropping in the hilly terrain of Himalayas: Sikkim, India. *Theor Appl Climatol* 121, 649–667. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1262-4>
- Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M., Dedieu, G., 2008. Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 644–655. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.015>
- Devia, G.K., Ganasri, B.P., Dwarakish, G.S., 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia* 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Dhakar, R., Sarath Chandran, M.A., Nagar, S., Visha Kumari, V., Subbarao, A.V.M., Bal, S.K., Vijaya Kumar, P., 2018. Field Crop Response to Water Deficit Stress: Assessment Through Crop Models, in: Bal, S.K., Mukherjee, J., Choudhury, B.U., Dhawan, A.K. (Eds.), *Advances in Crop Environment Interaction*. Springer Singapore, Singapore, pp. 287–315. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1861-0_11
- Dietzel, R., Liebman, M., Ewing, R., Helmers, M., Horton, R., Jarchow, M., Archontoulis, S., 2016. How efficiently do corn- and soybean-based cropping systems use water? A systems modeling analysis. *Glob Change Biol* 22, 666–681. <https://doi.org/10.1111/gcb.13101>
- Dong, W., Liu, E., Yan, C., Tian, J., Zhang, H., Zhang, Y., 2017. Impact of no tillage vs. conventional tillage on the soil bacterial community structure in a winter wheat cropping succession in northern China. *European Journal of Soil Biology* 80, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.03.001>
- Duchemin, B., Boulet, G., Maisongrande, P., Benhadj, I., Hadria, R., Khabba, S., Chehbouni, G., Ezzahar, J., Olioso, A., 2005. Un modèle simplifié pour l'estimation du bilan hydrique et du rendement de cultures céréalières en milieu semi-aride, in: 2. WATMED, Congrès Méditerranéen Des Ressources En Eau Dans Le Bassin Méditerranéen, Actes de WATMED 2, Deuxième Congrès Méditerranéen Des Ressources En Eau Dans Le Bassin Méditerranéen. Université Cadi Ayyad, Marrakech, Morocco.
- Duchemin, B., Hadria, R., Rodriguez, J.-C., Lahrouni, A., Khabba, S., Boulet, G., Mougenot, B., Maisongrande, P., Watts, C., 2003. Spatialisation of a crop model using phenology derived from remote sensing data, in: IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). Presented at the IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), pp. 2200–2202 vol.4. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294388>

- Dupraz, C., Liagre, F., 2008. *Agroforesterie: des arbres et des cultures*. France Agricole Editions.
- Durand, R., LEGROS, J.-P., SAMIE, C., HENSEL, E., Baculat, B., 1981. Cartographie automatique de l'énergie solaire en fonction du relief. *Agronomie* 1, 31–39.
- El Amami, H., Mekki, I., JACOB, F., Zairi, A., 2018. Socio-economic implications of global change on rainfed agriculture in Tunisia: A Case Study of Lebna Watershed. *Journal of New Sciences* 17).
- El Mokh, F., Vila-Garcia, Nagaz, K., Masmoudi, M.M., Ben Mechlia, N., Fereres, E., 2017. Calibration of AquaCrop Salinity Stress Parameters for Barley Under Different Irrigation Regimes in a Dry Environment, in: *Water and Land Security in Drylands; Response to Climate Change*.
- Emam, Y., Shekoofa, A., Salehi, F., Jalali, A.H., Pessarakli, M., 2010. Drought stress effects on two common bean cultivars with contrasting growth habits. *Archives of Agronomy and Soil Science* 58, 527–534. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.530256>
- Er-Raki, S., Bouras, E., Rodriguez, J.C., Watts, C.J., Lizarraga-Celaya, C., Chehbouni, A., 2021. Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agricultural Water Management* 245, 106585. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106585>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Clark, R.B., 2006. *Physiology of crop production*, Crop science. Food Products Press, New York.
- Faivre, R., Leenhardt, D., Voltz, M., Benoît, M., Papy, F., Dedieu, G., Wallach, D., 2009. Spatialising Crop Models, in: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Véronique, S., Alberola, C. (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 687–705. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_42
- Fang, H., Ye, Y., Liu, W., Wei, S., Ma, L., 2018. Continuous estimation of canopy leaf area index (LAI) and clumping index over broadleaf crop fields: An investigation of the PASTIS-57 instrument and smartphone applications. *Agricultural and Forest Meteorology* 253–254, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.003>
- FAO, 2022. *L'agriculture pluviale face aux changements climatiques en Afrique du Nord: Impact et perspective avec l'agroécologie*. FAO, Tunis, Tunisia., <https://doi.org/10.4060/cc0014fr>
- FAO (Ed.), 2021. *Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all, The state of food security and nutrition in the world*. FAO, Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4474en>
- FAO (Ed.), 2020. *Overcoming water challenges in agriculture, The state of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO, 2016. *Produire plus avec moins en pratique met en lumière l'importance des légumineuses dans les rotations culturales et les cultures intercalaires* | FAO [WWW

- Document]. URL <https://www.fao.org/pulses-2016/news/news-detail/fr/c/382161/> (accessed 1.24.23).
- FAO, 2013. International Year of Family Farming, 2014 (Master Plan). Rome.
- Farkas, Z., Varga-László, E., Anda, A., Veisz, O., Varga, B., 2020. Effects of Waterlogging, Drought and Their Combination on Yield and Water-Use Efficiency of Five Hungarian Winter Wheat Varieties. *Water* 12, 1318. <https://doi.org/10.3390/w12051318>
- Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S.S., Siddique, K.H.M., 2017. Drought Stress in Grain Legumes during Reproduction and Grain Filling. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203, 81–102. <https://doi.org/10.1111/jac.12169>
- Farooq, M., Rehman, A., Pisante, M., 2019. Sustainable Agriculture and Food Security, in: *Innovations in Sustainable Agriculture*. pp. 3–24.
- Fengrui, L., Songling, Z., Geballe, G.T., 2000. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 79, 129–142. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00149-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00149-8)
- Francesconi, W., Srinivasan, R., Pérez-Miñana, E., Willcock, S.P., Quintero, M., 2016. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. *Journal of Hydrology* 535, 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.034>
- Franco, J.G., King, S.R., Volder, A., 2018. Component crop physiology and water use efficiency in response to intercropping. *European Journal of Agronomy* 93, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.005>
- García-López, J., Lorite, I., García-Ruiz, R., Domínguez, J., 2014. Evaluation of three simulation approaches for assessing yield of rainfed sunflower in a Mediterranean environment for climate change impact modelling. *Climatic Change* 124, 147–162.
- García-Vila, M., Fereres, E., 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy* 36, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.003>
- Garnier, B.J., Ohmura, A., 1968. A Method of Calculating the Direct Shortwave Radiation Income of Slopes. *J. Appl. Meteor.* 7, 796–800. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1968\)007<0796:AMOCTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1968)007<0796:AMOCTD>2.0.CO;2)
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Taboada, C., Miranda, R., Cusicanqui, J., Mhizha, T., Vacher, J., 2009. Modeling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano. *Agricultural Water Management* 96, 1652–1658. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.020>
- Gibson, David.J., Connolly, J., Hartnett, David.C., Weidenhamer, Jeffrey.D., 1999. Designs for greenhouse studies of interactions between plants. *Journal of Ecology* 87, 1–16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00321.x>

- Ginot, V., Gaba, S., Beaudouin, R., Aries, F., Monod, H., 2006. Combined use of local and ANOVA-based global sensitivity analyses for the investigation of a stochastic dynamic model: Application to the case study of an individual-based model of a fish population. *Ecological Modelling* 3–4, 479–491. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.08.025>
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Gnouma, R., 2006. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron. L'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Golden, H.E., Lane, C.R., Amatya, D.M., Bandilla, K.W., Raanan Kiperwas, H., Knightes, C.D., Ssegane, H., 2014. Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods. *Environmental Modelling & Software* 53, 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.004>
- Guo, D., Zhao, R., Xing, X., Ma, X., 2019. Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66, 1115–1133. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1657845>
- Gura, I., Mnkeni, P.N.S., 2019. Crop rotation and residue management effects under no till on the soil quality of a Haplic Cambisol in Alice, Eastern Cape, South Africa. *Geoderma* 337, 927–934. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.042>
- Guyot, G., Mamy, P. de jean, 1997. atmosphère et climat, in: climatologie de l'environnement. Masson, p. 505.
- Habaieb, H., Hermassi, T., Ghedaoui, S., Anatar, I., 2014. Les lacs collinaires en Tunisie: technique de conservation des eaux et du sol 6.
- Hamdi, R., Lamachère, J.M., Raclot, D., 2010. L'équipement hydrométrique du bassin versant de Kamech (hors lac collinaire).
- Hamon, X., Dupraz, C., Liagre, F., 2009. L'agroforesterie, outil de séquestration du carbone en agriculture.
- Han, C., Zhang, B., Chen, H., Wei, Z., Liu, Y., 2019. Spatially distributed crop model based on remote sensing. *Agricultural Water Management* 218, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.035>
- Hansen, S., Abrahamsen, P., Petersen, C.T., Styczen, M., 2012. Daisy: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE* 55, 1317–1335. <https://doi.org/10.13031/2013.42244>
- Harmanny, K.S., Malek, Ž., 2019. Adaptations in irrigated agriculture in the Mediterranean region: an overview and spatial analysis of implemented strategies. *Reg Environ Change* 19, 1401–1416. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01494-8>

- Hatfield, J.L., Boote, K.J., Kimball, B.A., Ziska, L.H., Izaurralde, R.C., Ort, D., Thomson, A.M., Wolfe, D., 2011. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agronomy Journal* 103, 351–370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- Hatfield, J.L., Dold, C., 2019. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Front. Plant Sci.* 10, 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Ibrahim, E.A.H., 2005. Analyzing the connectivity potential of landscape geomorphic systems: a radar remote sensing and GIS approach, Estufa Canyon, Texas, USA (Book). Texas A&M University.
- Inoubli, N., 2016. Ruissellement et érosion hydrique en milieu méditerranéen vertique : approche expérimentale et modélisation (phdthesis). Montpellier SupAgro ; Institut national agronomique de Tunisie.
- Inoubli, N., Raclot, D., Mekki, I., Moussa, R., Le Bissonnais, Y., 2017. A Spatiotemporal Multiscale Analysis of Runoff and Erosion in a Mediterranean Marly Catchment. *Vadose Zone Journal* 16, vzj2017.06.0124. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0124>
- International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development Executive Summary of the Synthesis Report, 2008. , International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development.
- Jacob, F., Olioso, A., Weiss, M., Baret, F., Hauteceur, O., 2002. Mapping short-wave albedo of agricultural surfaces using airborne PoLDER data. *Remote Sensing of Environment* 80, 36–46. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00265-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00265-6)
- Jalota, S.K., Singh, S., Chahal, G.B.S., Ray, S.S., Panigrahy, S., Bhupinder-Singh, Singh, K.B., 2010. Soil texture, climate and management effects on plant growth, grain yield and water use by rainfed maize–wheat cropping system: Field and simulation study. *Agricultural Water Management* 97, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.012>
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27, 337–350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- Jeuffroy, M.-H., Ney, B., 1997. Crop physiology and productivity. *Field Crops Research, Improvement of Grain Legumes* 53, 3–16. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00019-1)
- Jin, X., Feng, H., Zhu, X., Li, Z., Song, S., Song, X., Yang, G., Xu, X., Guo, W., 2014. Assessment of the AquaCrop Model for Use in Simulation of Irrigated Winter Wheat Canopy Cover, Biomass, and Grain Yield in the North China Plain. *PLOS ONE* 9, e86938. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086938>
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>

- Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R., 2017. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems* 155, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* 18, 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Kanda, E., Mabhaudhi, T., Senzanje, A., 2018. Coupling hydrological and crop models for improved agricultural water management – A review. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 23, 380.
- Katerji, N., Campi, P., Mastrorilli, M., 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management* 130, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.005>
- Katerji, N., Mastrorilli, M., Rana, G., 2008. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy* 28, 493–507. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.12.003>
- Katerji, N., Rana, G., 2006. Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 138, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.006>
- Kaur, T., Arora, S. (Eds.), 2021. *Environmental Stress Physiology of Plants and Crop Productivity*. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS. <https://doi.org/10.2174/97816810879001210101>
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* 18, 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Keating, B.A., Thorburn, P.J., 2018. Modelling crops and cropping systems—Evolving purpose, practice and prospects. *European Journal of Agronomy* 100, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.007>
- Kersebaum, K.C., Hecker, J.-M., Mirschel, W., Wegehenkel, M., 2007. Modelling water and nutrient dynamics in soil–crop systems: a comparison of simulation models applied on common data sets.
- Kim, J., Choi, J., Choi, C., Park, S., 2013. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *Science of The Total Environment* 452–453, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.005>

- Kustas, W.P., Humes, K.S., Norman, J.M., Moran, M.S., 1996. Single- and Dual-Source Modeling of Surface Energy Fluxes with Radiometric Surface Temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 35, 110–121. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0110:SADSMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0110:SADSMO>2.0.CO;2)
- Lasserre, F., Brun, A., 2018. *Le partage de l'eau: une réflexion géopolitique*. Odile Jacob, Paris.
- Laux, P., Jäckel, G., Tingem, R.M., Kunstmann, H., 2010. Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon—A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 1258–1271. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.05.008>
- Leakey, A.D.B., Ferguson, J.N., Pignon, C.P., Wu, A., Jin, Z., Hammer, G.L., Lobell, D.B., 2019. Water Use Efficiency as a Constraint and Target for Improving the Resilience and Productivity of C3 and C4 Crops. *Annual Review of Plant Biology* 70, 781–808. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040305>
- Lebon, N., Dagès, C., Burger-Leenhardt, D., Molénat, J., 2022. A new agro-hydrological catchment model to assess the cumulative impact of small reservoirs. *Environmental Modelling & Software* 153, 105409. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105409>
- Leenhardt, D., Voltz, M., Barreteau, O., 2020. *L'eau en milieu agricole: outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*, Synthèses. Éditions Quae, Versailles.
- Léger, J.-F., Parant, A., 2021. Basculement démographique en Méditerranée : le Sud devenu la première puissance: Population & Avenir n° 753, 4–7. <https://doi.org/10.3917/popav.753.0004>
- Leuning, R., van Gorsel, E., Massman, W.J., Isaac, P.R., 2012. Reflections on the surface energy imbalance problem. *Agricultural and Forest Meteorology* 156, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.002>
- Lhomme, J.P., Mougou, R., Mansour, M., 2009. Potential impact of climate change on durum wheat cropping in Tunisia. *Climatic Change* 96, 549–564. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9571-9>
- Lionello, P., Scarascia, L., 2018. The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Reg Environ Change* 18, 1481–1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Liu, K., Harrison, M.T., Shabala, S., Meinke, H., Ahmed, I., Zhang, Y., Tian, X., Zhou, M., 2020. The State of the Art in Modeling Waterlogging Impacts on Plants: What Do We Know and What Do We Need to Know. *Earth's Future* 8. <https://doi.org/10.1029/2020EF001801>
- Lorite, I.J., García-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M., Fereres, E., 2013. AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Computers and Electronics in Agriculture* 96, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.05.010>

- Lovelli, S., Perniola, M., Ferrara, A., Di Tommaso, T., 2007. Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. *Agricultural Water Management* 92, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.005>
- Lu, Y., Chibarabada, T.P., McCabe, M.F., De Lannoy, G.J.M., Sheffield, J., 2021. Global sensitivity analysis of crop yield and transpiration from the FAO-AquaCrop model for dryland environments. *Field Crops Research* 269, 108182. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108182>
- Maidment, D.R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A., Fraczek, W., 1996. Unit Hydrograph Derived from a Spatially Distributed Velocity Field. *Hydrological Processes* 10, 831–844. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199606\)10:6<831::AID-HYP374>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199606)10:6<831::AID-HYP374>3.0.CO;2-N)
- Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P.H., Warren, J., Marek, G., 2019. Simulating Soil Water Content, Evapotranspiration, and Yield of Variably Irrigated Grain Sorghum Using AquaCrop. *J Am Water Resour Assoc* 55, 976–993. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12757>
- Mathieu, C., Lozet, J., 2011. *Dictionnaire encyclopédique de science du sol: avec index anglais-français*. Éd. Tec & doc, Paris.
- Mayor, Á.G., Bautista, S., Small, E.E., Dixon, M., Bellot, J., 2008. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands. *Water Resources Research* 44. <https://doi.org/10.1029/2007WR006367>
- Mazhoud, H., Chemak, F., Belhouchette, H., Chenoune, R., 2022. A Bio-Economic Model for Improving Irrigated Durum Wheat Performance and Regional Profits under Mediterranean Conditions. *Agriculture* 12, 618. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050618>
- Mbava, N., Mutema, M., Zengeni, R., Shimelis, H., Chaplot, V., 2020. Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. *Agricultural Water Management* 228, 105878. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105878>
- McLeod, A.R., Long, S.P., 1999. Free-air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) in Global Change Research: A Review, in: Fitter, A.H., Raffaelli, D. (Eds.), *Advances in Ecological Research*. Academic Press, pp. 1–56. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60028-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60028-8)
- Mehdi, B., Ludwig, R., Lehner, B., 2015. Evaluating the impacts of climate change and crop land use change on streamflow, nitrates and phosphorus: A modeling study in Bavaria. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, 60–90. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.009>
- Mekki, I., 2003. *Analyse et modélisation de la variabilité des flux hydriques à l'échelle d'un bassin versant cultivé alimentant un lac collinaire du domaine semi-aride méditerranéen (Oued Kamech, Cap Bon, Tunisie) (These de doctorat)*. Montpellier 2.

- Mekki, I., Albergel, J., Ben Mechlia, N., Voltz, M., 2006. Assessment of overland flow variation and blue water production in a farmed semi-arid water harvesting catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 31, 1048–1061. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.07.003>
- Mekki, I., Bailly, J.S., Jacob, F., Chebbi, H., Ajmi, T., Blanca, Y., Zairi, A., Biarnès, A., 2018a. Impact of farmland fragmentation on rainfed crop allocation in Mediterranean landscapes: A case study of the Lebna watershed in Cap Bon, Tunisia. *Land Use Policy* 75, 772–783. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.004>
- Mekki, I., Biarnès, A., Vinatier, F., Jenhaoui, Z., Raclot, D., Feurer, D., Ben Mechlia, N., 2013. Dynamique spatiotemporelle de l'activité agricole et de l'occupation du sol dans un petit bassin versant collinaire du Cap-Bon.
- Mekki, I., Chebbi, R.Z., Jacob, F., Masmoudi, M., Prévot, L., Mechlia, N.B., Voltz, M., Albergel, J., 2014. Water balance for different land use and crop sequences under semiarid environment 7.
- Mekki, I., Zitouna-Chebbi, R., JACOB, F., Ben Mechlia, N., Prévot, L., Albergel, J., Voltz, M., 2018b. Impact of land use on soil water content in a hilly rainfed agrosystem: a case study in the Cap Bon peninsula in Tunisia. *AGROFOR* 3. <https://doi.org/10.7251/AGRENG1801064M>
- Mekki, I., Zitouna-Chebbi, R., Masmoudi, M., Ben Mechlia, N., Jacob, F., 2014. Gestion de l'eau verte pour la durabilité des agrosystèmes collinaires 180–191.
- MingJin, Z., LiangHua, C., Jian, Z., XiangWei, H., Rui, X., 2016. Effect of drought stress and fertilization on accumulation and partitioning of biomass, C, N and P of *Puelia sinese* Roxb. *Journal of Northwest A & F University - Natural Science Edition* 44, 105–112.
- Mkhabela, M.S., Bullock, P.R., 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management* 110, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.009>
- Mojid, M.A., Wyseure, G.C.L., Mustafa, S.M.T., 2012. Water use efficiency and productivity of wheat as a function of clay amendment. *Environmental Control in Biology* 50, 347–362. <https://doi.org/10.2525/ecb.50.347>
- Molénat, J., Raclot, D., Zitouna, R., Andrieux, P., Coulouma, G., Feurer, D., Grunberger, O., Lamachère, J.M., Bailly, J.S., Belotti, J.L., Ben Azzez, K., Ben Mechlia, N., Ben Younès Louati, M., Biarnès, A., Blanca, Y., Carrière, D., Chaabane, H., Dagès, C., Debabria, A., Dubreuil, A., Fabre, J.C., Fages, D., Floure, C., Garnier, F., Geniez, C., Gomez, C., Hamdi, R., Huttel, O., Jacob, F., Jenhaoui, Z., Lagacherie, P., Le Bissonnais, Y., Louati, R., Louchart, X., Mekki, I., Moussa, R., Negro, S., Pépin, Y., Prévot, L., Samouelian, A., Seidel, J.L., Trotoux, G., Troiano, S., Vinatier, F., Zante, P., Zrelli, J., Albergel, J., Voltz, M., 2018. OMERE: A Long-Term Observatory of Soil and Water Resources, in Interaction with Agricultural and Land Management in Mediterranean Hilly Catchments. *Vadose Zone Journal* 17, 180086. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0086>

- Montes, C., Lhomme, J.-P., Demarty, J., Prévot, L., Jacob, F., 2014. A three-source SVAT modeling of evaporation: Application to the seasonal dynamics of a grassed vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 191, 64–80. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.004>
- Montoya, F., Camargo, D., Domínguez, A., Ortega, J.F., Córcoles, J.I., 2018. Parametrization of Cropsyst model for the simulation of a potato crop in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 203, 297–310. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.029>
- Moreno-de las Heras, M., Saco, P.M., Willgoose, G.R., Tongway, D.J., 2012. Variations in hydrological connectivity of Australian semiarid landscapes indicate abrupt changes in rainfall-use efficiency of vegetation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JG001839>
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., Daggupati, . D, 2015. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Trans. ASABE* 58, 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Moussa, R., Voltz, M., Andrieux, P., 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrol. Process.* 16, 393–412. <https://doi.org/10.1002/hyp.333>
- Mubvuma, Michael.T., Ogola, J.B.O., Mhizha, T., 2021. AquaCrop model calibration and validation for chickpea (*Cicer arietinum*) in Southern Africa. *Cogent Food & Agriculture* 7, 1898135. <https://doi.org/10.1080/23311932.2021.1898135>
- Muluneh, A., 2020. Impact of climate change on soil water balance, maize production, and potential adaptation measures in the Rift Valley drylands of Ethiopia. *Journal of Arid Environments* 179, 104195. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104195>
- Muluneh, A., Biazin, B., Stroosnijder, L., Bewket, W., Keesstra, S., 2015. Impact of predicted changes in rainfall and atmospheric carbon dioxide on maize and wheat yields in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Reg Environ Change* 15, 1105–1119. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0685-x>
- Muñoz-Villers, L.E., McDonnell, J.J., 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 3543–3560. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3543-2013>
- Musy, A., Higy, C., Reynard, E., 2014. *Hydrologie, 2e éd. revue et augmentée.* ed, Science & ingénierie de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Nanda, A., Sen, S., McNamara, J.P., 2019. How spatiotemporal variation of soil moisture can explain hydrological connectivity of infiltration-excess dominated hillslope: Observations from lesser Himalayan landscape. *Journal of Hydrology* 579, 124146. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124146>

- Narain, P., Singh, R.K., Sindhwal, N.S., Joshie, P., 1998. Water balance and water use efficiency of different land uses in western Himalayan valley region. *Agricultural Water Management* 37, 225–240. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00047-X)
- Nastos, P.T., Politi, N., Kapsomenakis, J., 2013. Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece. *Atmospheric Research, ADVANCES IN PRECIPITATION SCIENCE* 119, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.06.017>
- Neenu, S., Biswas, A.K., Subba Rao, A., 2013. IMPACT OF CLIMATIC FACTORS ON CROP PRODUCTION - A REVIEW. *Agricultural Reviews* 34, 97–106.
- Néron, F., 2018. Petit précis d'agriculture: de la politique à la technique le contexte de l'exploitation agricole, les productions végétales et animales, les différents types d'agriculture, 3e éd. ed, Agriproduction. Éditions France agricole, Paris.
- Nguyen, H.-T., 2012. Apport de la modélisation hydrologique distribuée à la gestion intégrée par bassin versant des ressources en eau. Université du Québec, Québec.
- Nielsen, D.C., Miceli-Garcia, J.J., Lyon, D.J., 2012. Canopy Cover and Leaf Area Index Relationships for Wheat, Triticale, and Corn. *Agronomy Journal* 104, 1569–1573. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0107n>
- Norouzi, M., Ayoubi, S., Jalalian, A., Khademi, H., Dehghani, A.A., 2010. Predicting rainfed wheat quality and quantity by artificial neural network using terrain and soil characteristics. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 60, 341–352. <https://doi.org/10.1080/09064710903005682>
- Nouri, H., Stokvis, B., Chavoshi Borujeni, S., Galindo, A., Brugnach, M., Blatchford, M.L., Alaghmand, S., Hoekstra, A.Y., 2020. Reduce blue water scarcity and increase nutritional and economic water productivity through changing the cropping pattern in a catchment. *Journal of Hydrology* 588, 125086. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125086>
- Nugroho, P., Marsono, D., Sudira, P., Suryatmojo, H., 2013. Impact of Land-use Changes on Water Balance. *Procedia Environmental Sciences, The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security, SUSTAIN 2012, 3-5 November 2012, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, JAPAN* 17, 256–262. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.036>
- Nyakudya, I.W., Stroosnijder, L., 2014. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management* 146, 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.024>
- Nyathi, M.K., van Halsema, G.E., Annandale, J.G., Struik, P.C., 2018. Calibration and validation of the AquaCrop model for repeatedly harvested leafy vegetables grown under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management* 208, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.012>
- Okin, G.S., Heras, M.M. las, Saco, P.M., Throop, H.L., Vivoni, E.R., Parsons, A.J., Wainwright, J., Peters, D.P., 2015. Connectivity in dryland landscapes: shifting

- concepts of spatial interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13, 20–27. <https://doi.org/10.1890/140163>
- Olesen, J.E., Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16, 239–262. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00004-7)
- Oweis, T., Zhang, H., Pala, M., 2000. Water Use Efficiency of Rainfed and Irrigated Bread Wheat in a Mediterranean Environment. *Semigroup Forum* 92. <https://doi.org/10.1007/s100870050027>
- Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J., Trnka, M., Bindi, M., Çaldağ, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Şaylan, L., Šiška, B., Rötter, R., 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy* 35, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.05.001>
- Pampana, S., Masoni, A., Arduini, I., 2016. Grain yield of durum wheat as affected by waterlogging at tillering. *Cereal Research Communications* 44, 706–716. <https://doi.org/10.1556/0806.44.2016.026>
- Papy, F., 2022. De la parcelle à la planète : problèmes d'échelle et de couplage entre fonctions de l'agriculture, in: *La fabrique de l'agronomie: De 1945 à nos jours*. Quae, Versailles.
- Pasquel, D., Roux, S., Richetti, J., Cammarano, D., Tisseyre, B., Taylor, J.A., 2022. A review of methods to evaluate crop model performance at multiple and changing spatial scales. *Precision Agric* 23, 1489–1513. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09885-4>
- Pereira, L.S., Allen, R.G., Smith, M., Raes, D., 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management, Agricultural Water Management: Priorities and Challenges* 147, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- 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](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Petit, O., 2020. Le cadre réglementaire, les acteurs et les instruments de la gestion intégrée des ressources en eau en France, in: *L'eau en milieu agricole: outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*, Synthèses. Éditions Quae, Versailles.
- Pirastru, M., Bagarello, V., Iovino, M., Marrosu, R., Castellini, M., Giadrossich, F., Niedda, M., 2017. Subsurface flow and large-scale lateral saturated soil hydraulic conductivity in a Mediterranean hillslope with contrasting land uses. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 297–306. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0006>
- Qin, W., Chi, B., Oenema, O., 2013. Long-Term Monitoring of Rainfed Wheat Yield and Soil Water at the Loess Plateau Reveals Low Water Use Efficiency. *PLOS ONE* 8, e78828. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078828>

- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop -The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agron. J.* 101, 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Rahaman, M., Mamidi, S., Rahman, M., 2018. Genome-wide association study of heat stress-tolerance traits in spring-type *Brassica napus* L. under controlled conditions. *The Crop Journal* 6, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.08.003>
- Raoufi, R.S., Soufizadeh, S., 2020. Simulation of the impacts of climate change on phenology, growth, and yield of various rice genotypes in humid sub-tropical environments using AquaCrop-Rice. *Int J Biometeorol* 64, 1657–1673. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01946-5>
- Rashid, M.A., Jabloun, M., Andersen, M.N., Zhang, X., Olesen, J.E., 2019. Climate change is expected to increase yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management* 222, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.004>
- Raupach, M.R., Finnigan, J.J., 1997. The influence of topography on meteorological variables and surface-atmosphere interactions. *Journal of Hydrology, Aggregate Description of Land-Atmosphere Interactions* 190, 182–213. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03127-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03127-7)
- Reeves, D.W., 1994. Cover Crops and Rotations, in: *Crops Residue Management*. CRC Press.
- Refshaard, J.C., Storm, B., 1995. MIKE SHE. Computer models of watershed hydrology. 809–846.
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grünwald, T., Havránková, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.-M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11, 1424–1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- Revaillet, S., Pouget, C., Alvarez, G., Fontaine, S., 2021. Mesurer la capacité de rétention en eau d'un sol par centrifugation : une méthode fiable, facile et rapide à mettre en œuvre dans un laboratoire (Les Cahiers des techniques de l'INRA). INRAE.
- Rinderer, M., Ali, G., Larsen, L.G., 2018. Assessing structural, functional and effective hydrologic connectivity with brain neuroscience methods: State-of-the-art and research directions. *Earth-Science Reviews* 178, 29–47. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.01.009>
- Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D.C., Bowen, W.T., 1998. Cereal growth, development and yield, in: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production, Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 79–98. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_5

- Rizzo, D., Marraccini, E., Lardon, S., Rapey, H., Debolini, M., Benoît, M., Thenail, C., 2013. Farming systems designing landscapes: land management units at the interface between agronomy and geography. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 113, 71–86. <https://doi.org/10.1080/00167223.2013.849391>
- Rockström, J., Barron, J., 2007. Water productivity in rainfed systems: overview of challenges and analysis of opportunities in water scarcity prone savannahs. *Irrig Sci* 25, 299–311. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0062-3>
- Ruben, R., Pender, J., 2004. Rural diversity and heterogeneity in less-favoured areas: the quest for policy targeting. *Food Policy* 29, 303–320. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2004.07.004>
- Saco, P.M., Moreno-de las Heras, M., Keesstra, S., Baartman, J., Yetemen, O., Rodríguez, J.F., 2018. Vegetation and soil degradation in drylands: Non linear feedbacks and early warning signals. *Current Opinion in Environmental Science & Health, Sustainable soil management and land restoration* 5, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.06.001>
- Saco, P.M., Rodríguez, J.F., Moreno-de las Heras, M., Keesstra, S., Azadi, S., Sandi, S., Baartman, J., Rodrigo-Comino, J., Rossi, M.J., 2020. Using hydrological connectivity to detect transitions and degradation thresholds: Applications to dryland systems. *CATENA* 186, 104354. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104354>
- Sadras, V.O., Calviño, P.A., 2001. Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. *Agronomy Journal* 93, 577–583. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.933577x>
- Sainju, U.M., Lenssen, A.W., Caesar-TonThat, T., Jabro, J.D., Lartey, R.T., Evans, R.G., Allen, B.L., 2011. Dryland residue and soil organic matter as influenced by tillage, crop rotation, and cultural practice. *Plant Soil* 338, 27–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0403-5>
- Salazar, R.C., 2021. Towards an ontological approach for the management of agroforestry databases (phdthesis). Université Montpellier.
- Salman, M., García-Vila, M., Fereres, E., Raes, D., Steduto, P., 2021. The AquaCrop model – Enhancing crop water productivity: Ten years of development, dissemination and implementation 2009–2019. *Food & Agriculture Org.*
- Sandhu, R., Irmak, S., 2019. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management* 223, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Sghaier, N., Masmoudi, M.M., Ben Mechlia, N., 2014. Paramétrage du modèle AquaCrop pour la simulation de la culture du blé dur. *Revue des Régions Arides*.

- Siad, S.M., Iacobellis, V., Zdruli, P., Gioia, A., Stavi, I., Hoogenboom, G., 2019. A review of coupled hydrologic and crop growth models. *Agricultural Water Management* 224, 105746. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105746>
- Silvestro, P.C., Pignatti, S., Yang, H., Yang, G., Pascucci, S., Castaldi, F., Casa, R., 2017. Sensitivity analysis of the Aquacrop and SAFYE crop models for the assessment of water limited winter wheat yield in regional scale applications. *PLoS ONE* 12, e0187485. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187485>
- Sinclair, T.R., 2018. Effective Water Use Required for Improving Crop Growth Rather Than Transpiration Efficiency. *Frontiers in Plant Science* 9.
- Sinclair, T.R., Horie, T., 1989. Leaf Nitrogen, Photosynthesis, and Crop Radiation Use Efficiency: A Review. *Crop Science* 29, crops1989.0011183X002900010023x. <https://doi.org/10.2135/crops1989.0011183X002900010023x>
- Sinclair, T.R., Tanner, C.B., Bennett, J.M., 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production. *BioScience* 34, 36–40. <https://doi.org/10.2307/1309424>
- Singh, D.L., Beg, M.K.A., Akhter, S., Qayoom, S., Lone, B.A., Singh, Purshotam, Singh, Parmeet, 2014. Efficient Techniques to increase Water Use Efficiency under Rainfed Eco-systems. *Journal of AgriSearch* 1.
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Avant, B., Muche, M., 2018. An Overview of Rainfall-Runoff Model Types. *International Congress on Environmental Modelling and Software*.
- Skaalsveen, K., Ingram, J., Clarke, L.E., 2019. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. *Soil and Tillage Research* 189, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.004>
- Smith, A., Snapp, S., Chikowo, R., Thorne, P., Bekunda, M., Glover, J., 2017. Measuring sustainable intensification in smallholder agroecosystems: A review. *Global Food Security* 12, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.11.002>
- Soddu, A., Deidda, R., Marrocu, M., Meloni, R., Paniconi, C., Ludwig, R., Sodde, M., Mascaro, G., Perra, E., 2013. Climate Variability and Durum Wheat Adaptation Using the AquaCrop Model in Southern Sardinia. *Procedia Environmental Sciences* 19, 830–835. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.092>
- Soltani, A., Sinclair, T.R., 2015. A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment.
- Soltani, A., Sinclair, T.R., 2012. *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABI.
- Soltner, D., 1985. *Les bases de la production végétale*, 13ème édition. ed, Sciences et techniques agricoles.
- Soltner, D., 1984. *Les bases de la production végétale*, 3ème édition. ed, Sciences et techniques agricoles.

- Spinoni, J., Vogt, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., 2014. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen-Geiger classification and FAO aridity index: TOWARDS IDENTIFYING AREAS AT CLIMATOLOGICAL RISK OF DESERTIFICATION. *Int. J. Climatol* 35, 2210–2222. <https://doi.org/10.1002/joc.4124>
- Sreelash, K., Buis, S., Sekhar, M., Ruiz, L., Kumar Tomer, S., Guérif, M., 2017. Estimation of available water capacity components of two-layered soils using crop model inversion: Effect of crop type and water regime. *Journal of Hydrology* 546, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.049>
- Steduto, P., Albrizio, R., 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea II. water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agricultural and forest meteorology*.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agron. J.* 101, 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* 18, 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Stroosnijder, L., Moore, D., Alharbi, A., Argaman, E., Biazin, B., van den Elsen, E., 2012. Improving water use efficiency in drylands. *Current Opinion in Environmental Sustainability, Terrestrial systems* 4, 497–506. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.08.011>
- Susha Lekshmi, S.U., Singh, D.N., Shojaei Baghini, M., 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* 54, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Tanyeri-Abur, A., 2015. Food Security in the Southern Mediterranean/North Africa, in: Vastola, A. (Ed.), *The Sustainability of Agro-Food and Natural Resource Systems in the Mediterranean Basin*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16357-4_1
- Temani, F., Bouaziz, A., Daoui, K., Wery, J., Barkaoui, K., 2021. Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 307, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107234>
- Tetzlaff, D., Soulsby, C., Bacon, P.J., Youngson, A.F., Gibbins, C., Malcolm, I.A., 2007. Connectivity between landscapes and riverscapes—a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? *Hydrological Processes* 21, 1385–1389. <https://doi.org/10.1002/hyp.6701>
- Tian, L., Zhang, Y., Chen, P., Zhang, F., Li, J., Yan, F., Dong, Y., Feng, B., 2021. How Does the Waterlogging Regime Affect Crop Yield? A Global Meta-Analysis. *Front. Plant Sci.* 12, 634898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634898>

- Tian, Y.Q., Davies-Colley, R.J., Gong, P., Thorrold, B.W., 2001. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology* 109, 67–74. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00245-3)
- Tilman, D., Clark, M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature* 515, 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.-T.A., Stöckle, C., Steduto, P., 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agron. J.* 101, 509–521. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s>
- Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., Chehbouni, A., 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management* 163, 219–235. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.007>
- Tribouillois, H., Constantin, J., Willaume, M., Brut, A., Ceschia, E., Tallec, T., Beaudoin, N., Therond, O., 2018. Predicting water balance of wheat and crop rotations with a simple model: AqYield. *Agricultural and Forest Meteorology* 262, 412–422. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.026>
- Trombetta, A., Iacobellis, V., Tarantino, E., Gentile, F., 2016. Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. *Agricultural Water Management* 164, 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.013>
- Tromp-van Meerveld, H.J., McDonnell, J.J., 2006. On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale. *Advances in Water Resources, Experimental Hydrology: A Bright Future* 29, 293–310. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.02.016>
- Tuppad, P., Douglas-Mankin, K.R., Lee, T., Arnold, J.G., 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrologic/Water Quality Model: Extended Capability and Wider Adoption. *Transactions of the ASABE* 54, 1677–1684. <https://doi.org/10.13031/2013.39856>
- Turnbull, L., Wainwright, J., Brazier, R.E., 2008. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: ecohydrological interactions across multiple-space and time scales. *Ecohydrology* 1, 23–34. <https://doi.org/10.1002/eco.4>
- Vadez, V., Pilloni, R., Grondin, A., Hajjarpoor, A., Belhouchette, H., Brouziyne, Y., Chehbouni, G., Kharrou, M.H., Zitouna-Chebbi, R., Mekki, I., Molénat, J., Jacob, F., Bossuet, J., 2023. Water Use Efficiency (WUE) across scales: From genes to landscape. *Journal of Experimental Botany* erad052. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad052>
- Van Gaelen, H., Vanuytrecht, E., Willems, P., Diels, J., Raes, D., 2017. Bridging rigorous assessment of water availability from field to catchment scale with a parsimonious agro-hydrological model. *Environmental Modelling & Software* 94, 140–156. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.014>

- Van Loo, M., Verstraeten, G., 2021. A Spatially Explicit Crop Yield Model to Simulate Agricultural Productivity for Past Societies under Changing Environmental Conditions. *Water* 13, 2023. <https://doi.org/10.3390/w13152023>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Willems, P., 2014. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software* 51, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.017>
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. w., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M. h., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S. d., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., Ghezzehei, T., Hallett, P., Hendricks Franssen, H. j., Heppell, J., Horn, R., Huisman, J. a., Jacques, D., Jonard, F., Kollet, S., Lafolie, F., Lamorski, K., Leitner, D., McBratney, A., Minasny, B., Montzka, C., Nowak, W., Pachepsky, Y., Padarian, J., Romano, N., Roth, K., Rothfuss, Y., Rowe, E. c., Schwen, A., Šimůnek, J., Tiktak, A., Van Dam, J., van der Zee, S. e. a. t. m., Vogel, H. j., Vrugt, J. a., Wöhling, T., Young, I. m., 2016. Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal* 15, v2j2015.09.0131. <https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>
- Viketoft, M., 2008. Effects of six grassland plant species on soil nematodes: A glasshouse experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 906–915. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.11.006>
- Wang, S., Fu, Z., Chen, H., Nie, Y., Xu, Q., 2020. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope. *Journal of Hydrology* 580, 124370. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124370>
- Wani, S.P., Rockström, J., Oweis, T.Y., 2009. *Rainfed Agriculture: Unlocking the Potential*. CABI.
- Waongo, M., Laux, P., Kunstmann, H., 2015. Adaptation to climate change: The impacts of optimized planting dates on attainable maize yields under rainfed conditions in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology* 205, 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.006>
- Weiler, M., McDonnell, J.J., Tromp-van Meerveld, I., Uchida, T., 2005. Subsurface Stormflow, in: Anderson, M.G., McDonnell, J.J. (Eds.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, p. hsa119. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa119>
- Weiss, M., Frederic, B., de Solan, B., Demarez, V., Bertrand, N., 2008. CAN-EYE, logiciel de traitement d'images pour l'estimation de l'indice foliaire. *Le cahier des techniques de l'INRA. Pratique et outils de mesure des rayonnements naturels* 159–166.
- Weiss, M., Jacob, F., Duveiller, G., 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment* 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L.J., Fanzo, J.,

- Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J.A., Vries, W.D., Sibanda, L.M., Afshin, A., Chaudhary, A., Herrero, M., Agustina, R., Branca, F., Lartey, A., Fan, S., Crona, B., Fox, E., Bignet, V., Troell, M., Lindahl, T., Singh, S., Cornell, S.E., Reddy, K.S., Narain, S., Nishtar, S., Murray, C.J.L., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* 393, 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [EPIC, Erosion-Productivity Impact Calculator, mathematical models]. *Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers] (USA)*.
- Wolka, K., Biazin, B., Martinsen, V., Mulder, J., 2021. Soil and water conservation management on hill slopes in southwest Ethiopia. II. Modeling effects of soil bunds on surface runoff and maize yield using AquaCrop. *Journal of Environmental Management* 296, 113187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113187>
- Xing, H., Xu, X., Li, Z., Chen, Y., Feng, H., Yang, G., Chen, Z., 2017. Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. *Journal of Integrative Agriculture* 16, 2444–2458. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61626-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61626-X)
- Yadari, H.E., Chikhaoui, M., Naimi, M., Sabir, M., Raclot, D., 2019. Techniques de conservation des eaux et des sols au Maroc: Aperçu et perspectives. 1 7.
- Yan, R., Zhang, X., Yan, S., Zhang, J., Chen, H., 2018. Spatial patterns of hydrological responses to land use/cover change in a catchment on the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators, Multi-Scale Ecological Indicators for Supporting Sustainable Watershed Management* 92, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.013>
- Yang, J.M., Yang, J.Y., Liu, S., Hoogenboom, G., 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems* 127, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.008>
- Yang, Yanmin, Anwar, M., O’Leary, G., Macadam, I., Yang, Yonghui, 2015. Water use efficiency and crop water balance of rainfed wheat in a semi-arid environment: sensitivity of future changes to projected climate changes and soil type. *Theoretical and Applied Climatology* 123. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1376-3>
- Young, A.M., Friedl, M.A., Seyednasrollah, B., Beamesderfer, E., Carrillo, C.M., Li, X., Moon, M., Arain, M.A., Baldocchi, D.D., Blanken, P.D., Bohrer, G., Burns, S.P., Chu, H., Desai, A.R., Griffis, T.J., Hollinger, D.Y., Litvak, M.E., Novick, K., Scott, R.L., Suyker, A.E., Verfaillie, J., Wood, J.D., Richardson, A.D., 2021. Seasonality in aerodynamic resistance across a range of North American ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 310, 108613. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108613>
- Yuan, M., Zhang, L., Gou, F., Su, Z., Spiertz, J.H.J., van der Werf, W., 2013. Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in semi-arid Inner Mongolia. *Agricultural Water Management* 122, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.006>

- Zelege, K.T., 2019. AquaCrop Calibration and Validation for Faba Bean (*Vicia faba* L.) under Different Agronomic Managements. *Agronomy* 9, 320. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060320>
- Zhang, J., Zhang, S., Cheng, M., Jiang, H., Zhang, X., Peng, C., Lu, X., Zhang, M., Jin, J., 2018. Effect of Drought on Agronomic Traits of Rice and Wheat: A Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15, 839. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050839>
- Zhang, Q., Liu, J., Yu, X., Chen, L., 2019. Scale effects on runoff and a decomposition analysis of the main driving factors in Haihe Basin mountainous area. *Science of The Total Environment* 690, 1089–1099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.540>
- Zhang, X., Hu, M., Guo, X., Yang, H., Zhang, Z., Zhang, K., 2018. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China. *CATENA* 160, 394–402. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.013>
- Zhaoxiang, W., Huihu, L., Qiaoli, L., Changyan, Y., Faxin, Y., 2020. Application of bio-organic fertilizer, not biochar, in degraded red soil improves soil nutrients and plant growth. *Rhizosphere* 16, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100264>
- Zitouna-Chebbi, R., 2009. Observations et caractérisation des échanges d'eau et d'énergie dans le continuum sol – plante – atmosphère en condition de relief collinaire. Cas du bassin versant Kamech, Cap Bon, Tunisie.
- Zitouna-Chebbi, R., Jacob, F., Prévot, L., Voltz, M., 2023. Documenting evapotranspiration and surface energy fluxes over rainfed annual crops within a Mediterranean hilly agrosystem. *Agricultural Water Management* 277, 108117. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108117>
- Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Chakhar, A., Marniche-Ben Abdallah, M., Jacob, F., 2018. Observing Actual Evapotranspiration from Flux Tower Eddy Covariance Measurements within a Hilly Watershed: Case Study of the Kamech Site, Cap Bon Peninsula, Tunisia. *Atmosphere* 9, 68. <https://doi.org/10.3390/atmos9020068>
- Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Jacob, F., Mougou, R., Voltz, M., 2012. Assessing the consistency of eddy covariance measurements under conditions of sloping topography within a hilly agricultural catchment. *Agricultural and Forest Meteorology* 164, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.010>
- Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Jacob, F., Voltz, M., 2015. Accounting for vegetation height and wind direction to correct eddy covariance measurements of energy fluxes over hilly crop fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120, 4920–4936. <https://doi.org/10.1002/2014JD022999>
- Zuecco, G., Rinderer, M., Penna, D., Borga, M., van Meerveld, H.J., 2019. Quantification of subsurface hydrologic connectivity in four headwater catchments using graph theory. *Science of The Total Environment* 646, 1265–1280. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.269>