



HAL
open science

Caractérisation des irrigations gravitaires au moyen d'un modèle d'écoulement et de mesures in-situ : application à l'optimisation de l'irrigation du foin de Crau par calan

Mohamed Alkassem-Alosman

► To cite this version:

Mohamed Alkassem-Alosman. Caractérisation des irrigations gravitaires au moyen d'un modèle d'écoulement et de mesures in-situ : application à l'optimisation de l'irrigation du foin de Crau par calan. Sciences de la Terre. Université d'Avignon, 2016. Français. NNT : 2016AVIG0679 . tel-01617021

HAL Id: tel-01617021

<https://theses.hal.science/tel-01617021>

Submitted on 16 Oct 2017

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.



THESE

pour obtenir le grade de docteur de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

Caractérisation des irrigations gravitaires au moyen d'un modèle d'écoulement et de mesures in-situ : Application à l'optimisation de l'irrigation du foin de Crau par calan

Présentée publiquement

par

Mohamed ALKASSEM ALOSMAN

Soutenue le 30 / 09 / 2016, devant le jury composé de :

1- R. ANGULO- JARAMILLO	HDR, CNRS ENTPE UCB-Lyon	Rapporteur
2- G. BELAUD	Professeur, SupAgro Montpellier	Rapporteur
3- V. VALLES	Professeur, Université d'Avignon	Président du jury
4- A. MÉROT	Chercheuse, INRA Montpellier	Examineur
5- A. OLIOSO	HDR, INRA Avignon	Directeur de thèse
6- S. RUY	Chercheur, INRA Avignon	Examineur - encadrant

Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants, Stéphane Ruy et Albert Olioso, qui m'ont permis d'avancer et construire mon travail dans les meilleures conditions grâce à leur expérience et à leur accompagnement. Je n'oublie pas également le soutien qu'ils ont su me témoigner au cours de ces trois années.

Un grand merci aussi à Samuel Buis et Patrice Lecharpentier pour m'avoir fait découvrir et apprécier le monde de la modélisation.

Je remercie également l'ensemble de l'unité EMMAH, et notamment Fabrice Flamain, Bernard Bès, Micheline Debroux, Arnaud Chapelet et Dominique Renard, qui m'ont accompagné lors de mes nombreuses expérimentations sur le terrain.

Je tiens à remercier aussi François Charron, Directeur adjoint du Domaine du Merle et Didier Tronc, directeur du Comité de foin de la Crau, pour leur connaissance du territoire de la Crau et de ses acteurs, qui m'a permis d'identifier les agriculteurs contributeurs à mon travail au travers des sites expérimentaux.

Et bien sûr, un grand merci à l'ensemble des agriculteurs et leur arroseur, pour leur accueil chaleureux, la mise à disposition de parcelles expérimentales et à l'intérêt qu'ils ont montré à mes travaux. Je pense en particulier à messieurs Jacques Bellone, Frédéric Blanc, Benoit Cauvin, Jean-Marie Dardar, Jean Jarrige, David Laforest, Jean-Louis Martel, Pascal Mille, Didier Poujol et Maurice Tricon.

Table des matières

Table des illustrations.....	5
Introduction générale.....	7
1 Partie I : Introduction	13
1.1 Chapitre 1 : Description générale du site d'étude, la plaine de la Crau.....	15
1.1.1 Climatologie, pédologie et hydrogéologie de la Crau :	15
1.1.2 Usage des sols, agronomie et irrigation sur la Crau	33
1.1.3 Les changements globaux sur le territoire de la Crau.....	48
1.1.4 Travaux réalisés dans l'UMR EMMAH sur le système Crau et points de blocage	52
1.2 Chapitre 2 : représentation et modélisation de l'infiltration gravitaire.....	59
1.2.1 Introduction du Chapitre 2.....	59
1.2.2 Équations macroscopiques utilisées pour décrire l'irrigation par submersion.....	59
1.2.3 Les différentes lois d'infiltration.....	65
1.2.4 Présentation de différents modèles opérationnels	69
1.2.5 Utilisation des modèles opérationnels en mode inverse : estimation des propriétés des sols et des doses appliquées	73
1.2.6 Conclusion	74
1.3 Chapitre 3 : Démarche globale (organisation du travail)	77
2 Partie 2 : Matériels et Méthodes	79
2.1 Chapitre 1 : Le modèle d'irrigation gravitaire CALHY.....	81
2.1.1 Présentation du modèle	81
2.1.2 Critique des hypothèses du modèle de Green et Ampt.....	84
2.1.3 Signification et estimation des paramètres hydrauliques et hydrodynamiques du modèle Calhy.....	86
2.1.4 Détermination par modélisation d'une configuration expérimentale permettant l'estimation des paramètres hydrauliques et hydrodynamiques du modèle Calhy.	88
2.2 Les sites expérimentaux et les protocoles expérimentaux	93
2.2.1 Suivi de l'évolution de la hauteur de la lame d'eau	95
2.2.2 Suivi de l'avancement de la lame d'eau au cours de l'irrigation.....	99
2.2.3 Mesures de débit.....	100
2.2.4 Mesures des géométries des parcelles et de l'épaisseur du sol	101
2.2.5 La teneur en eau du sol	102
2.3 Les enquêtes menées chez les exploitants agricoles	103
2.4 Outils numériques utilisés avec le modèles Calhy : analyse de sensibilité par la méthode FAST et méthode inverse du SIMPLEX	105

2.4.1	Analyse de sensibilité du modèle Calhy par la méthode FAST	106
2.4.2	La méthode SIMPLEX (multi-start bound-constrained simplex) et l'inversion du modèle Calhy.....	109
3	Partie 3 : Résultats et Discussions	115
3.1	Chapitre 1 : Caractérisation du modèle CALHY ;	117
	“Global sensitivity analysis for identification the key estimation of Calhy’s parameters using accessible operational outputs”	117
3.2	Inversion du modèle Calhy : “Estimation Of Soil Hydrodynamic Parameters And Soil Hydraulic Roughness Through Inverse Modelling And Flooding Irrigation Experiments”	153
3.3	Chapitre 3 : Utilisation D’un Modèle A Base Physique Pour L’Optimisation Multicritères De L’irrigation Des Prairies Par Submersion	191
3.4	Chapitre 4 : Caractérisation empirique de l’irrigation Estimating irrigation dose over grassland borders using regression models with field dimensions and inflow rate.....	207
4	Partie 4 : Discussion générale et conclusion	241
4.1	Discussion générale	241
4.2	Conclusion	253
	Références :	257
	Annexes	267
	Annexe (1). Analyse de sensibilité préalable des proxys variables de modèle Calhy aux cinq paramètres d’entrée.	269
	Annexe (2). L’ajustement des paramètres de modèle Calhy par l’inversion du modèle et avec des data synthétiques des proxys variables proposé.	273
	Annexe (3). Etalonnage des sondes CS616.....	275
	Annexe (4) Les enquêtes ont été réalisées à l'aide d'un entretien direct avec les exploitants à la Crau :	281
	Résumé.....	295

Table des illustrations

Figure i-1 : La disponibilité des ressources en eau dans les bassins méditerranéens.	9
Figure i-2 : Schéma de la démarche générale de la thèse.	11
Figure 1-1: La plaine de Crau et sa nappe superficielle (délimité en rouge) qui s'étend entre Arles, Fos et Salon de Provence. Les différentes communes sont présentées. Source SymCrau, (2012).	15
Figure 1-2: Diagrammes des précipitations en mm (axes de gauche), températures en °C (axes de droite) dans trois stations de Crau durant la période de 1997 à 2006: Salon de Provence (Le Merle), Saint-Martin de Crau (Grand Carton) et Port-Saint-Louis. Source Wolff, (2010).	17
Figure 1-3: Données des précipitations mensuelles (cumul mensuel, hauteur maximum sur 24 heure et cumul sur toute l'année) pour 2012 une année particulièrement sèche ; a) à Salon de Provence (nord de la Crau), b) à Istres (sud de la Crau). Source SymCrau, (2012)	17
Figure 1-4 : Évapotranspiration potentielle calculée selon la méthode Penman (moyenne 1981-1990). Source Bessonnet, (2002).	19
Figure 1-5: Données climatiques journalières au Domaine du Merle (Salon de Provence) pendant la saison d'irrigation en 2003, incluant l'évapotranspiration de référence calculée avec la formule de Penman ETP_{Penman} , les températures maximale, minimale et moyenne ainsi que la vitesse du vent. Source Saos, (2003).	19
Figure 1-6 : La carte géologique de la Crau et les différentes zones géologique. 1 : Seuil de St Pierre-de-Vence, 2 : Seuil d'Eyguières, 3 : Seuil de Lamanon, 4 : Marais des baux, 5 : Chateau de Beauregard, 6 : source de Mouriès, 7 : Le grand Brahis, 8 : le Merle, 9 : Le Luquier, 10 : Terrusse, 11 : Etang d'Entressen, 12 : Etang des Aulnes, 13 : Vergières, 14 : Le Tubé, aérodrome et 15 : Marais de vigeirat.	21
Figure 1-7: Échelle des temps géologiques montrant les étapes successives de la formation de la Crau. Source Wolff, (2010).	23
Figure 1-8: Carte de l'épaisseur des sols en fonction de la mise en place de l'irrigation. Source Trolard et al., (2012).	24
Figure 1-9: Profils types des sols. Source d'après Wolff, (2010).	25
Figure 1-10 : Hauteurs piézométriques de la nappe dans une zone irriguée et une zone non irriguée exprimées par différence à la moyenne sur la période. Le piézomètre IJS est localisé au Domaine du Merle, quelques kilomètres à l'ouest de Salon-de-Provence. Le piézomètre P29B (hors zone irriguée) est situé dans les Coussouls en bordure nord-ouest de l'aéroport d'Istres – Le Tubé. Sont aussi représentés le drainage (journalier simulé au moyen du simulateur Crau décrit plus bas) sous une parcelle de prairie irriguée et la pluviométrie mensuelle au Domaine du Merle. Source : Oliosio et al. (2013b).	27
Figure 1-11 : Les écoulements et les conditions aux limites de la nappe de la Crau. Source (SymCrau, 2014).	29
Figure 1-12: Principales plantes présentes dans le foin de Crau AOC. D'après Comité de foin de Crau.	37
Figure 1-13, Carte d'occupation du sol de la plaine de Crau. Source : SymCrau, (2014)	38
Figure 1-14: Visualisation des différentes branches du canal de Craponne sur la carte de Cassini (XVIIIème siècle).	40
Figure 1-15 : Evolution du débit maximum prélevable en Durance par le canal de Craponne, d'après Michel (2011). Le dernier point (1963) correspond à la mise en service de l'aménagement hydroélectrique de la Durance et à un prélèvement dans le canal usinier EDF.	41

Figure 1-16: Les différents Associations syndicales d'Arrosant à la Crau. Source « Contrat de canal Crau sud Alpilles ».....	46
Figure 1-17: Développement des surfaces irriguées à partir de la construction de l'œuvre de Craponne au XVIe siècle. Source (Wolff, 2010).....	48
Figure 1-18 : Architecture de la chaine de modélisation de l'agro-hydrosystème de la Crau (Baillieux et al., 2015).....	53
Figure 1-19. Colonne de gauche : cartographie du rendement, du drainage et du niveau de l'aquifère en situation actuelle ; Colonne de droite : différence par rapport à la situation présente d'une situation future qui considère les changements climatiques en 2030, une baisse de la disponibilité de l'eau de la Durance pour l'irrigation de 30% et une urbanisation ayant consommé près de 12 % des prairies irriguées (pour l'essentiel autour des grands centres urbains). D'après Olioso et al. (2013a).	56
Figure 1-20 : Relation empirique calculant la dose d'irrigation apportée en fonction de la longueur de la parcelle (Tourmetz, 2010).	57
Figure 2-1: Résultats des essais d'infiltration à charge constante de type "Porchet" réalisé sur le poudingue induré ("taparas") de la Crau de Miramas au Nord de Fos sur Mer. D'après la figure 12 de (ICF Environnement, 2009).	85
Figure 2-2, Évolution de la lame d'eau en trois points de la parcelle et caractéristiques étudiées de ces évolutions.	90
Figure 2-3 : la distribution des expérimentations parcellaires de suivis d'irrigation sur la plaine de la Crau.	95
Figure 2-4: Schéma de l'implantation des sondes capacitives en amont et en aval de la parcelle.	96
Figure 2-5: Dispositif d'étalonnage des sondes capacitives CS616. (a) Pour étudier la sensibilité des signaux délivrés par les sondes aux différentes températures et niveaux de salinité de l'eau. (b) pour calibrer les signaux délivrés par rapport aux hauteurs d'eau observées.	98
Figure 2-6: les courbes d'étalonnage après la campagne de suivi pour chaque sonde correspondant à une profondeur d'enfoncement des électrodes de 10 cm dans le sol.....	99
Figure 2-7: Schéma du suivi de l'avancement de la lame d'eau,.....	100
Figure 2-8: Schéma d'implantation des points de mesure de la vitesse d'écoulement dans une section transversale du canal d'amenée de l'eau.	101
Figure 2-9 : Répartition des caractéristiques des parcelles et des débits d'irrigation obtenues à partir des enquêtes chez les exploitants de foin de Crau : (a) la longueur de la parcelle, (b) le débit théorique alloué par l'ASA, (c) la surface parcellaire et (d) la largeur de la parcelle.	103

Introduction générale

Les surfaces irriguées représentent 20% de la totalité des surfaces cultivées (FAO, 2011), mais elles représentent près de 70% des prélèvements d'eau douce et 90% des quantités d'eau consommées effectivement (Siebert et al., 2010). Au niveau planétaire, environ 42% de la production agricole est obtenue par des cultures irriguées, ce pourcentage passe à 47% dans les régions développées (Bruinsma, 2009). Satisfaire les besoins alimentaires mondiaux à l'horizon 2050 nécessite d'augmenter de 70 % la production agricole, ce qui passe, en particulier, par une agriculture plus productive et le développement des surfaces irriguées (Bruinsma, 2009). Ceci va conduire à une augmentation de la demande en eau pour l'irrigation dans le futur proche alors que de nombreuses régions souffrent actuellement de déficit hydrique et que les ressources en eau ne sont pas réparties uniformément. C'est le cas en particulier dans les régions du pourtour méditerranéen.

En effet, dans le bassin méditerranéen, les ressources en eau représentent 1,2 % des réserves mondiales alors qu'il regroupe 6 % de la population mondiale. Au sein de cette région, les ressources en eau sont réparties de façon hétérogène : elles sont essentiellement concentrées dans les bassins méditerranéens de France, d'Italie, de Grèce et de Turquie, alors que les pays de la rive sud ont un déficit en eau marqué.

Sur l'ensemble du bassin méditerranéen, les ressources en eau sont soumises à des pressions importantes et croissantes en raison de l'augmentation de la population et des évolutions climatiques qui dans certaines zones se traduisent déjà par une augmentation des déficits hydriques. La croissance de la population concerne surtout les pays du sud et de l'est du bassin avec un doublement du nombre d'habitants entre 1970 et 2000 (116 Mhab et 234 Mhab, respectivement ; source Plan Bleu 2005). Pour la même période, les pays du nord ont eu un taux d'augmentation beaucoup plus faible, la population passant de 169 Mhab en 1970 à 193 Mhab en 2000. Les prévisions futures montrent des augmentations sur un rythme similaire au sud et à l'est (327 Mhab en 2025) et un tassement au nord (197 Mhab en 2025).

Les pourtours du Bassin Méditerranéen sont très sensibles aux changements climatiques : à l'horizon 2050 les températures augmenteraient de 1,5 à 2,5 °C et s'accompagneraient d'une diminution des précipitations annuelles qui pourraient atteindre de 5 à 20 % (Milano et al., 2012). Cela provoquerait une diminution significative de la disponibilité de l'eau pouvant atteindre 50 % (Milano et al., 2013), voir Figure i-1.

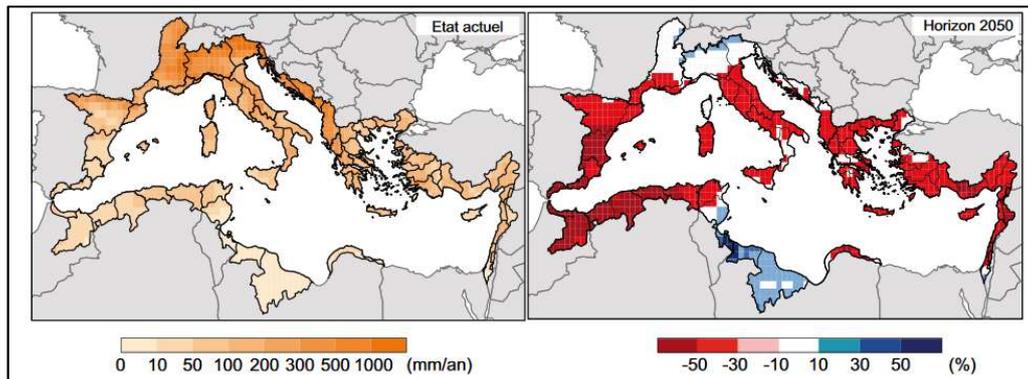


Figure i-1: La disponibilité des ressources en eau dans les bassins méditerranéens. Source (Milano et al., 2013).

L'ensemble des facteurs démographiques et climatiques se traduisent par une augmentation des prélèvements d'eau en particulier du fait du développement de l'irrigation. Dans le futur (2050) les prélèvements d'eau pourraient ainsi doubler ou tripler. Au nord c'est surtout l'augmentation des surfaces irriguées qui serait le facteur prépondérant. Une des voies d'atténuation de ces impacts se trouve dans l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation, en particulier des systèmes gravitaires qui présentent la plus faible efficacité hydraulique.

L'irrigation gravitaire est un système d'irrigation traditionnel qui est largement répandu au niveau mondial et représente 85% de la totalité des systèmes d'irrigation appliqués aux surfaces cultivées en 2007 selon FAO, (2016). Dans ce système d'irrigation, de gros volumes d'eau sont apportés à la parcelle. Ils génèrent des pertes d'eau importantes sous forme de drainage ou de sortie en aval de parcelle. Pour cela l'irrigation gravitaire est reconnue comme étant fortement consommatrice d'eau et ayant une faible efficacité. L'optimisation de ce système pourrait être atteinte en améliorant les pratiques d'irrigation actuelles en changeant les géométries parcellaires, le mode de submersion ou la durée d'irrigation (Clemmens, 2009; Moravejalahkami et al., 2009).

Un modèle numérique d'irrigation de surface pourrait être utilisé pour aider à concevoir cette optimisation. Pour cela il devrait représenter les deux principaux processus impliqués dans l'irrigation d'une parcelle agricole : l'infiltration d'eau dans le sol et la propagation de la lame d'eau à la surface du sol. Les paramètres d'un tel modèle doivent être mesurés ou estimés. Il s'agit de paramètres d'infiltration et des paramètres de rugosité de surface de la parcelle. Ces paramètres sont difficiles à obtenir du fait de la variabilité spatiale au sein des parcelles et de

l'interaction entre les deux processus d'infiltration et de propagation qui agissent de manière opposée : la propagation tend à diminuer la recharge du sol en eau, alors que l'infiltration augmente cette recharge.

La région Crau-Camargue au sud de la France se caractérise par la présence de milieux naturels qui ont un fort intérêt écologique dû à leur biodiversité, en particulier les Coussouls en Crau et les zones humides de Camargue. Il s'y trouve aussi des activités agricoles qui ont un rôle important en contribuant à maintenir les écosystèmes ainsi que les équilibres hydrosalins dans les aquifères, l'irrigation gravitaire des prairies et la riziculture contribuant fortement à la recharge des nappes. L'eau nécessaire pour ces pratiques d'irrigation est amenée par canaux depuis la Durance et le Rhône.

Dans le futur, une baisse de la ressource hydrique due aux changements climatiques associée à une augmentation des besoins en eau pour l'agriculture, l'alimentation en eau potable, les activités industrielles et les usage récréatifs de l'eau pourraient générer des conflits d'usage et conduire à une diminution des quantités d'eau allouées à l'agriculture, à des changements de pratiques agricoles et au final pourraient menacer l'équilibre actuel du système écologique. Ces tensions sur la ressource, accompagnées de restriction pour l'irrigation en Crau, se sont manifestées récemment en 2005 et 2007. D'après (Baillieux et al., 2015), la fréquence d'apparition de ces pénuries d'eau actuellement estimée à une année sur quinze pourrait s'accroître pour atteindre une année sur quatre à l'horizon 2035-2065.

La compréhension des fonctionnalités du système écologique de la région Crau-Camargue nécessite l'évaluation des fonctionnements des hydro-systèmes dans cette région : l'estimation des quantités d'eau apportées par irrigation (prairies et rizières), la quantification des sources de la recharge des nappes, ... et l'analyse de leurs effets selon des futurs scénarios climatiques et de disponibilité des ressources en eau. Des recherches sont menées depuis plusieurs années sur les régions Crau et Camargue par l'unité EMMAH pour répondre à ces questions.

Sur le territoire de la Crau plus spécifiquement, l'unité EMMAH a développé un modèle de fonctionnement intégré (Oliosio et al., 2013a, 2013b). Ce modèle a permis d'évaluer la production des prairies et les différents termes du bilan hydrique de la nappe de Crau, surtout celui lié à la recharge par l'irrigation qui très mal connu. Ces prédictions sont sensibles aux calculs des doses appliquées à chaque parcelle durant chaque irrigation. Ces doses sont calculées en fonction de la longueur de la parcelle à l'aide d'un modèle empirique établi par

(Tourmetz, 2010) à partir de mesures réalisées sur une exploitation de prairies en Crau. La validité de ce modèle a été remise en cause par (Oliosio et al., 2013b). Mon travail vise à mieux caractériser les irrigations, ce qui doit permettre d'améliorer ou proposer une alternative à ce modèle de dose.

La complexité du mode d'irrigation gravitaire due à l'interaction entre ses différents processus hydraulique (infiltration et ruissellement) conduit à une mauvaise connaissance de la dose d'irrigation réellement apportée. Améliorer le calcul des doses apportées nécessite de développer une méthodologie permettant de quantifier les vrais volumes d'eau injectés et leur distribution au sein de la parcelle entre pertes par drainage profond, recharge de la réserve utile du sol RU et perte en aval de parcelle. Cette méthodologie devra (i) permettre d'identifier les facteurs déterminant de l'irrigation au niveau parcellaire incluant les propriétés du sol (RU et conductivité hydraulique à saturation K_{sat}), (ii) proposer une méthode d'estimation de ces facteurs et des voies d'optimisation de l'irrigation afin de réduire la consommation d'eau. Le modèle de dose ainsi créé pourrait aussi être appliqué sur une grande échelle.

Pour cela, une démarche a été mise en œuvre à trois niveaux :

- échelle parcellaire : à cette échelle nous voulons évaluer et mettre en œuvre un système numérique permettant d'analyser les comportements du système d'irrigation, de calculer les différentes composantes du bilan hydrique à la parcelle lors d'une irrigation, d'estimer les facteurs ou paramètres principaux de l'irrigation à partir de dispositifs expérimentaux simples et déployables à grande échelle,
- échelle de l'exploitation : nous voulons développer un modèle de dose d'irrigation à partir des expérimentations des suivis et des enquêtes menées chez les exploitants sur les pratiques d'irrigation,
- échelle régionale : nous voulons évaluer le modèle de calcul de la dose d'irrigation et analyser les changements globaux en élaborant des scénarios futurs et quantifier leurs impacts sur la recharge souterraine.

La démarche générale mise en œuvre est expliquée sur la Figure i-2 ci-dessous.

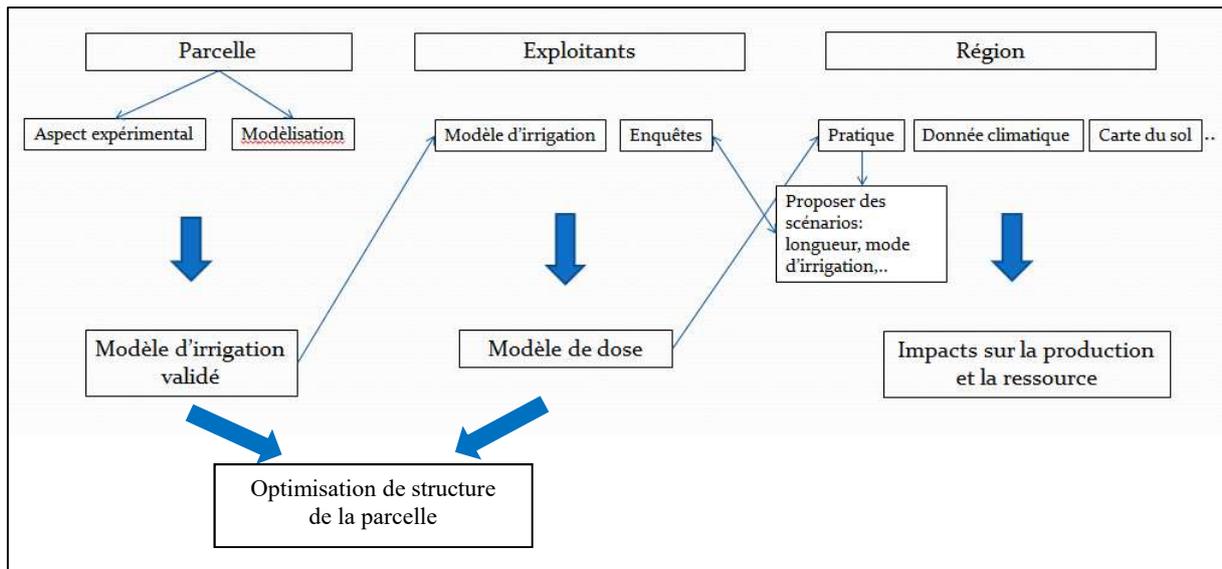


Figure i-2 : Schéma de la démarche générale de la thèse.

1 Partie I : Introduction

Deux chapitres vont être présentés dans cette partie de la thèse décrivant le contexte général de la zone d'étude et les modèles caractérisant l'irrigation de surface. À la fin de cette partie nous allons décrire la démarche globale mise en œuvre dans cette thèse.

Dans le premier chapitre, les descriptions climatologique, pédologique et hydrogéologique de la plaine de Crau sont présentées. Nous exposons d'abord les conditions climatiques qui caractérisent cette région. Ces conditions incluent les températures, les précipitations, le vent et l'évapotranspiration. Puis le contexte géologique et pédologique est présenté ici en montrant l'origine, la formation et les différents types du sol qu'on peut trouver sur la Crau. Après nous décrivons les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de la Crau en mettant l'accent sur différentes estimations de son bilan hydrique annuel et en insistant sur les principales sources d'incertitudes existants actuellement sur les différents termes du bilan. L'occupation du sol et le système d'irrigation traditionnel par submersion ou irrigation gravitaire, majoritaire sur la zone, sont aussi présentés. Les changements globaux sur l'usage du sol, le climat et les pratiques d'irrigation et leurs conséquences sur la disponibilité des ressources hydrique à la Crau sont décrits à la fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre est dédié dans un premier temps à la présentation des modèles théoriques et des équations gouvernant les deux principaux processus de l'irrigation gravitaire : l'infiltration dans le sol et le ruissellement à la surface du sol. Dans un second temps, nous présentons les différents modèles numériques utilisables pour modéliser et analyser l'irrigation gravitaire.

Enfin, les démarches suivies pour organiser les étapes successives de ce travail de thèse sont présentées à la fin de cette partie.

1.1 Chapitre 1 : Description générale du site d'étude, la plaine de la Crau

1.1.1 Climatologie, pédologie et hydrogéologie de la Crau :

La Crau est une plaine alluviale, une dénomination biogéographique qui s'applique au delta fossile de la Durance, qui s'étend sur 642 km². Elle se situe dans le Sud de la France (43°33'N, 4°52'W) au sein du département des Bouches du Rhône, entre la chaîne des Alpilles et la mer Méditerranée. La Crau s'étend sur un territoire qui forme un triangle compris entre les communes d'Arles, de Salon-de-Provence et de Fos sur mer (Figure 1-1). Elle est entourée par les limites naturelles constituées par le massif des Alpilles au nord, l'étang de Berre à l'est, le grand Rhône à l'ouest et le golfe de Fos au sud. Elle forme avec la Camargue une des deux grandes plaines de Basse-Provence. Elle domine une nappe d'eau superficielle d'environ 54 000 ha : la nappe de Crau. (Beltrando, 2015a; Trolard et al., 2012; Wolff, 2010)

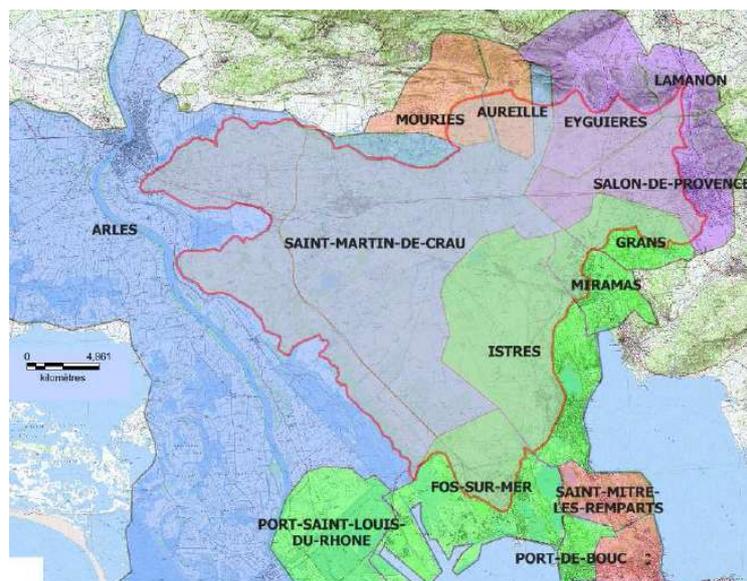


Figure 1-1: La plaine de Crau et sa nappe superficielle (délimité en rouge) qui s'étend entre Arles, Fos et Salon de Provence. Les différentes communes sont présentées. Source SymCrau, (2012).

1.1.1.1 Climat :

La plaine de Crau bénéficie d'un climat méditerranéen, qui est caractérisé par un hiver relativement doux, un été sec et chaud et des précipitations irrégulières concentrées sur l'automne. À cause de sa situation géographique, un vent sec appelé « mistral », fréquent et violent, tend à accentuer la sécheresse et l'évapotranspiration des cultures (Merot, 2007; SymCrau, 2012; Wolff, 2010).

1.1.1.1.1 Les températures

Les températures en Crau sont en moyenne annuelles de l'ordre de 15 à 16°C. Elles sont relativement douces en hiver, ne descendant que rarement en dessous de zéro malgré l'influence refroidissante du Mistral avec des moyennes de 7-8°C.

En été (juillet et août sont les mois les plus chauds) les moyennes sont de 24-25°C, la température maximale journalière dépasse souvent 30°C. La chaleur est amplifiée dans certaines zones de la Crau appelées Coussouls qui sont des zones steppiques avec une très forte pierrosité, où les galets jouent un rôle d'accumulateur thermique. De fortes températures sont observées les dernières années sur la région pendant la période estivale, avec des valeurs maximales pouvant atteindre 39°C au mois de juillet.

1.1.1.1.2 Les précipitations

Du sud au nord, la Crau reçoit en moyenne interannuelle des précipitations cumulées de 540 à 600 mm (Tableau 1.1). Les précipitations sont très variables d'une année à l'autre, avec des minima de l'ordre de 350 mm et des maxima de l'ordre de 800 mm. Les moyennes mensuelles des précipitations sont irrégulièrement réparties sur l'année et trois périodes peuvent être définies. Ce sont (voir Figure 1-2):

- une saison pluvieuse orageuse : concentrée en automne avec une pluviométrie cumulée moyenne allant jusqu'à 210 mm sur septembre et octobre, et de l'ordre de 40 à 60 mm pour novembre et décembre.
- une saison à pluviosité modérée : de janvier à mai.
- une saison sèche estivale : en été de juin à août, avec une moyenne mensuelle de l'ordre de 15-20 mm représentant au total moins de 6 % des précipitations annuelles.

Pour autant, des variations locales peuvent être observées : le nord de la plaine, en piémont des Alpilles, tend à recevoir plus de précipitations que le centre et le sud (voir Figure 1-3).

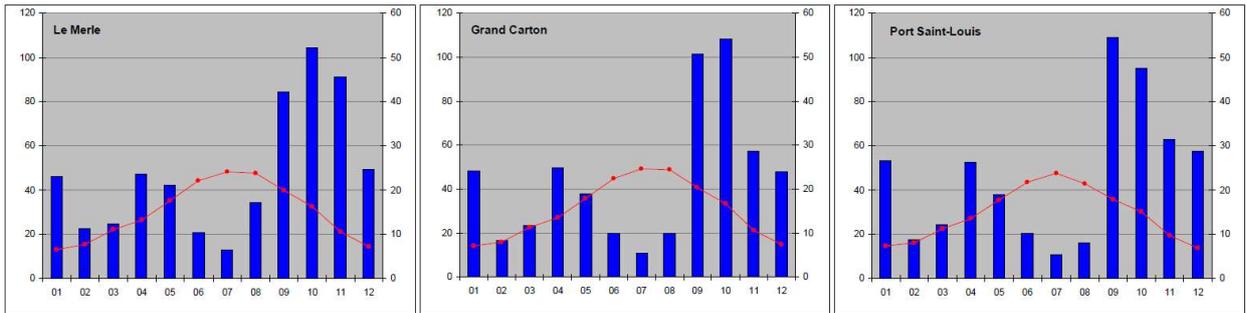


Figure 1-2: Diagrammes des précipitations en mm (axes de gauche), températures en °C (axes de droite) dans trois stations de Crau durant la période de 1997 à 2006: Salon de Provence (Le Merle), Saint-Martin de Crau (Grand Carton) et Port-Saint-Louis. Source Wolff, (2010).

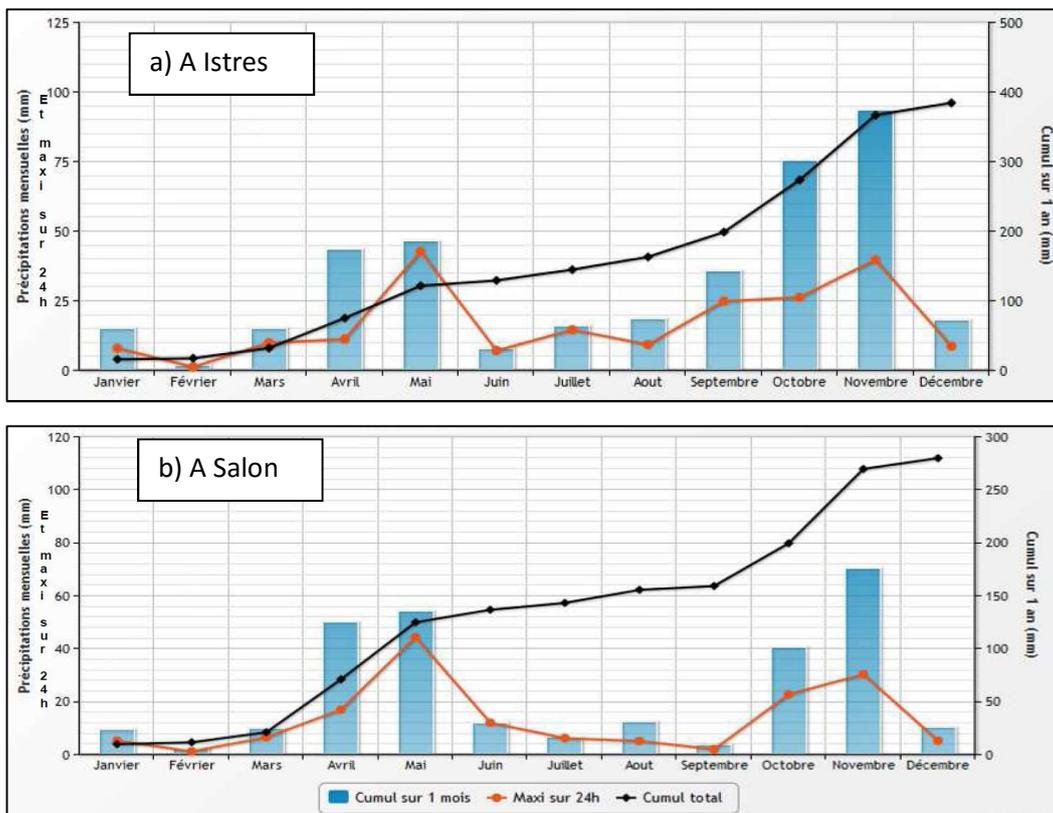


Figure 1-3: Données des précipitations mensuelles (cumul mensuel, hauteur maximum sur 24 heure et cumul sur toute l'année) pour 2012 une année particulièrement sèche ; a) à Salon de Provence (nord de la Crau), b) à Istres (sud de la Crau). Source SymCrau, (2012)

1997-2006	Précipitations (mm)	T mini (°C)	T maxi (°C)	T moy. (°C)	Humidité de l'air (%)	Vent (m/s)	Rayonnement global (j/cm ²)
Janvier	48.3	2.7	11.4	7.0	82.4	3.8	594
Février	16.5	2.9	12.9	7.9	75.6	4.1	977
Mars	23.5	5.6	16.9	11.2	71.9	4.2	1486
Avril	49.7	7.9	19.0	13.4	69.7	4.5	1928
Mai	37.9	12.1	23.7	17.9	70.9	3.6	2309
Juin	19.8	16.2	28.5	22.4	62.5	3.9	2639
Juillet	10.9	18.5	30.9	24.7	59.0	4.1	2617
Août	20.0	18.4	30.5	24.5	63.7	3.8	2190
Septembre	101.5	15.0	25.7	20.4	72.1	3.6	1689
Octobre	108.1	12.0	21.3	16.6	80.7	3.3	1046
Novembre	57.3	6.4	14.9	10.6	82.0	3.9	702
Décembre	47.7	3.1	11.7	7.4	82.3	3.8	537
Moyenne	(total) 541	10.1	20.6	15.3	72.7	3.9	1559

Tableau 1.1: Moyenne mensuelles des données météorologiques pour la période de 1997 à 2006 à Saint-Martin de la Crau. Source Wolff, (2010).

1.1.1.1.3 L'évapotranspiration potentielle

Le climat méditerranéen sur la plaine de la Crau se caractérise par l'intensité de l'évapotranspiration de référence ET_{ref} (anciennement appelée évapotranspiration potentielle ETP) en raison de la forte insolation ainsi que de l'influence régulière du vent dominant, le Mistral (Bessonnet, 2002). La moyenne annuelle observée de l'évapotranspiration potentielle dans cette région est de l'ordre de 1200 mm. Les valeurs maximales sont observées pendant cinq ou six mois par an d'avril à septembre (valeur maximale de 219 mm en juillet, calculée au moyen de la formule de Penman sur la période 1981-1990), mois où les précipitations sont faibles (Figure 1-4). Le minima est en hiver : ET_{ref} mensuelle de 27 mm en décembre (Bessonnet, 2002). Lors de la période estivale, l' ET_{ref} varie entre 6 et 8 mm/j, avec des maxima à 10 mm/j (Figure 1-5).

Au cours de l'année, l'évapotranspiration de référence mensuelle a une évolution inverse de celle des précipitations. Les différences entre les deux permettent de distinguer deux périodes en termes de déficit potentiel (Bessonnet, 2002; Djouabi, 2004; Rigaud et Shahzad, 2007):

- une période de février à septembre où l'évapotranspiration est bien supérieure aux précipitations contribuant ainsi à un bilan hydrique négatif (bilan hydrique déficitaire), ce qui impose l'irrigation pendant cette période ;
- une période d'octobre à janvier qui se caractérise à la fois par une ET_{ref} faible et des pluies potentiellement très importantes, contribuant ainsi à un bilan hydrique excédentaire.

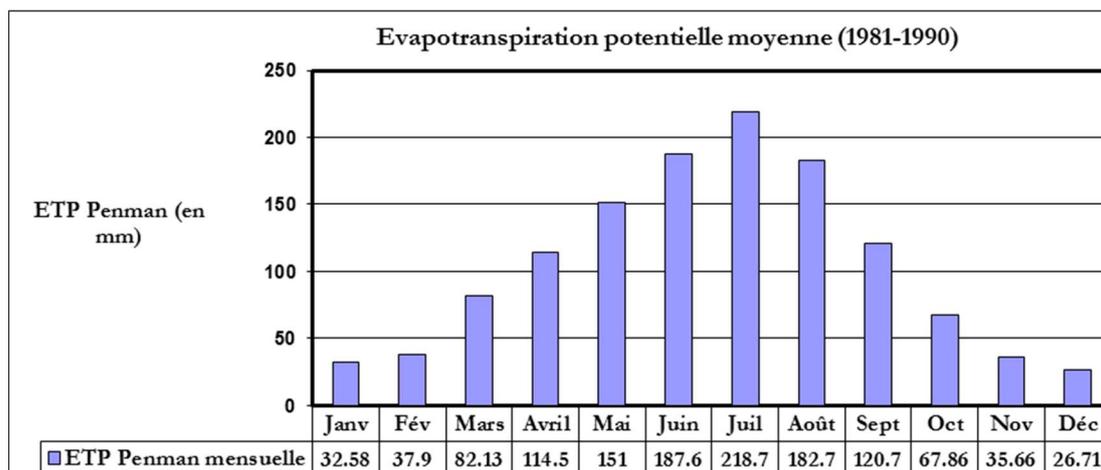


Figure 1-4 : Évapotranspiration potentielle calculée selon la méthode Penman (moyenne 1981-1990). Source Bessonnet, (2002).

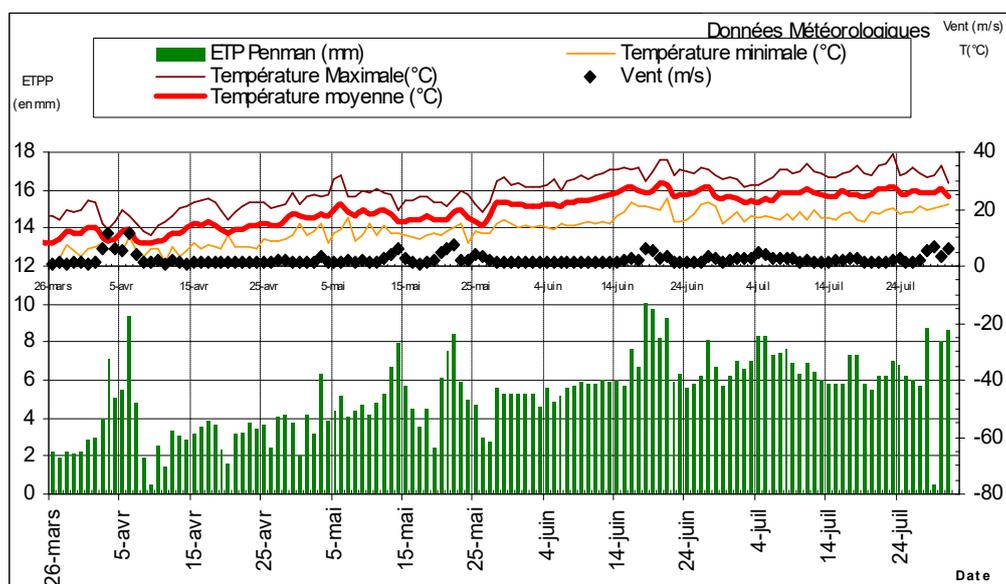


Figure 1-5: Données climatiques journalières au Domaine du Merle (Salon de Provence) pendant la saison d'irrigation en 2003, incluant l'évapotranspiration de référence calculée avec la formule de Penman ETP_{Penman} , les températures maximale, minimale et moyenne ainsi que la vitesse du vent. Source Saos, (2003).

1.1.1.1.4 Le vent « Mistral »

La Crau subit l'influence d'un vent froid sec et parfois violent « le Mistral », qui peut atteindre des vitesses supérieures à 100 km/h. Cette vitesse élevée est facilitée par la faible altitude du massif des Alpilles et la rareté des obstacles présents sur la plaine de Crau. Sa fréquence annuelle est relativement élevée puisqu'on estime sa présence entre 105 et 140

jours par an. Il souffle du nord et nord-ouest en suivant le couloir rhodanien et couvre partiellement la vallée de la Durance. L'influence du Mistral est considérable dans la climatologie de la plaine de Crau. Il contribue à l'augmentation de l'évapotranspiration qui peut dépasser 10 mm par jour (Figure 1-5) et accentue fortement l'aridité du milieu.

1.1.1.2 *Géologie et Pédologie*

1.1.1.2.1 Formation Géologique de la Crau

Dans la plupart de la Crau, le substratum est constitué de dépôts argileux du Pliocène. Dans la plaine orientale il est constitué par les marnes sableuses du Miocène.

La plaine de la Crau correspond au delta fossile de la Durance, mis en place au cours du Quaternaire. Sa formation débute avec la mise en place du golfe durancien lors de la transgression Miocène. La mer va submerger la basse vallée rhodanienne et suivre le cours de la Durance puis elle se retire rapidement à la fin du Miocène.

Durant le Villafranchien inférieur (-2 MA à -800 000 ans), le dépôt de la Vieille Crau ou Crau d'Arles se met en place. La Durance pénètre alors en Crau par le seuil de Saint-Pierre de Vence. Celle-ci dépose une couche importante d'alluvions et forme un paléo-delta au niveau de Saint Martin de Crau.

Plusieurs glaciations ont créé les paléo-chenaux de la Durance, qui traverse la Crau, en déposant des cailloutis glaciaires (épaisseur comprise entre 0 et 50 mètres) :

- 1^{ère} glaciation de Günz (-600 000 ans à -540 000 ans) : une dérive progressive du lit de la Durance s'amorce vers le sud-est ;
- 2^{ème} glaciation de Mindel (-480 000 à -430 000 ans) : la Durance dérive vers le sud-est (Entressen) sous l'effet des déformations tectoniques ; elle abandonne le seuil de Saint-Pierre de Vence pour traverser celui d'Eyguières ;
- 3^{ème} glaciation de Riss (-240 000 à -180 000 ans) : alluvionnement de la Crau du Luquier.
- 4^{ème} glaciation - Würm I (-80 000 à -62 000 ans) : suite à une nouvelle dérivation de la Durance vers le sud-est, la Crau de Miramas se forme ;
- 4^{ème} glaciation - Würm III (-35 000 ans à -10 000 ans) : la Durance quitte la Crau ; à la fin du Pléistocène, un mouvement tectonique détruit le seuil d'Orgon et ouvre le passage actuel de la Durance pour rejoindre le Rhône au sud d'Avignon ; la Durance abandonne son embouchure dans le Golfe de Fos et devient un simple affluent du Rhône ; le delta, forgé pendant deux millions d'années, s'assèche.

(Bouteyre and Duclos, 1994; Wolff, 2010)

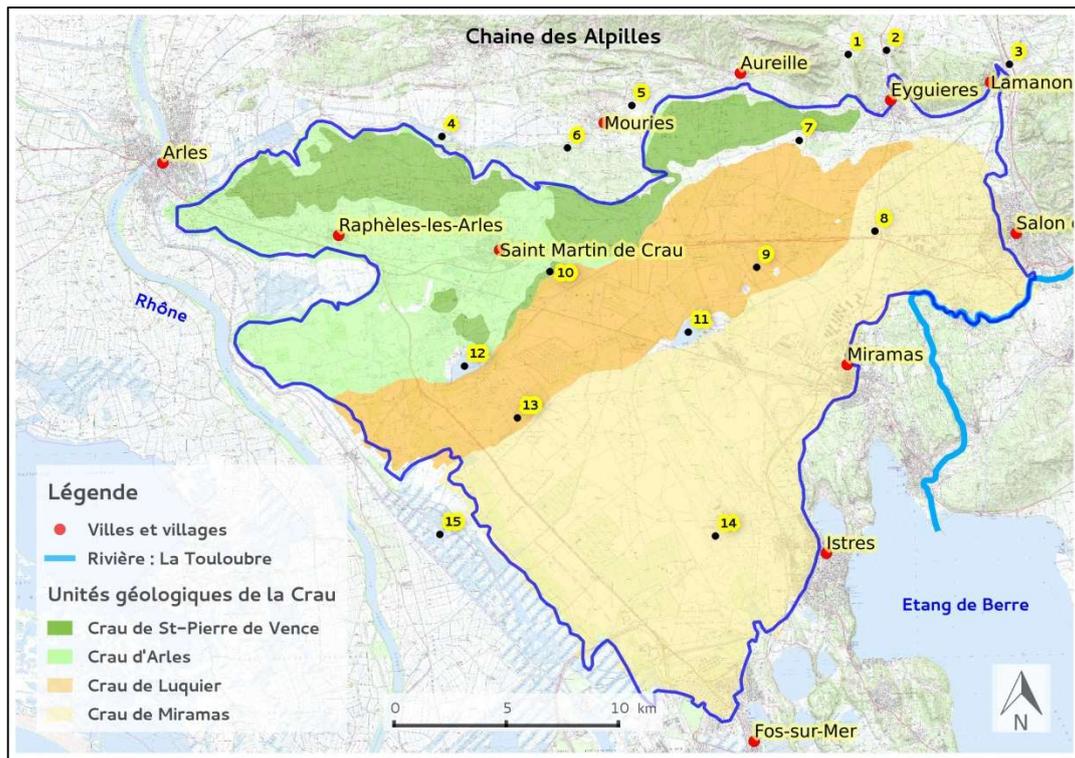


Figure 1-6 : La carte géologique de la Crau et les différentes zones géologique. 1 : Seuil de St Pierre-de-Vence, 2 : Seuil d'Eyguières, 3 : Seuil de Lamanon, 4 : Marais des baux, 5 : Chateau de Beauregard, 6 : source de Mouriès, 7 : Le grand Brahis, 8 : le Merle, 9 : Le Luquier, 10 : Terrusse, 11 : Etang d'Entressen, 12 : Etang des Aulnes, 13 : Vergières, 14 : Le Tubé, aérodrome et 15 : Marais de vigueirat.

1.1.1.2.2 Les dépôts duranciens

Les galets que l'on peut observer dans la Crau ont une origine fluviale. Ils sont de nature variable reflétant la diversité des terrains traversés par la Durance.

L'épaisseur de ces formations atteint une quinzaine de mètres en moyenne et peut aller jusqu'à un maximum de l'ordre de 50 mètres. Les plus épais sont ceux des paléo-vallées duranciennes qui constituent les chenaux d'écoulement préférentiel de la nappe d'eau souterraine.

Les eaux d'infiltration sur la Crau issues des eaux de ruissellement provenant du massif calcaire des Alpilles, fortement chargées en Ca^{2+} , carbonate CO_3^{2-} et bicarbonate HCO_3^- précipitent au cours de leur infiltration : les carbonates de calcium ainsi créés jouent le rôle de ciment en profondeur (CaCO_3) ce qui conduit à un encroûtement calcaire, appelé le « taparas », que l'on peut rencontrer à quelques décimètres de profondeur sur toute la plaine de la Crau. En fonction de la disposition des dépôts duranciens et de leur nature géologique, la Crau peut être divisée en plusieurs zones, voir Figure 1-6.

La Vieille Crau : elle est constituée par les plus anciens apports de la Durance, incluant La Crau d'Arles et La Crau de Saint-Pierre de Vence.

- La Crau d'Arles: s'est formée au Villafranchien inférieur. Elle se situe sur toute la bordure nord de la Crau entre Eyguières et Arles. Les cailloutis calcaires jurassiques et crétacés subalpins, qui constituent des galets calcaires, sont dominants. Les galets de quartzites sont également abondants. La taille des galets varie entre 10 à 15 cm. L'épaisseur des dépôts est en moyenne de l'ordre de 30 mètres et peut atteindre 55 m dans la gouttière Raphaële-Saint Martin.
- La Crau de Saint-Pierre de Vence : De formation intermédiaire entre la Crau d'Arles et la jeune Crau, elle recouvre par endroits les formations Villafranchiennes sur une hauteur n'excédant pas un mètre.

La Jeune Crau qui inclut deux ensembles successifs de dépôts fluviaux pendant les deux dernières périodes du Quaternaire (Riss ou Würm). Elle est caractérisée par la prédominance des quartzites, l'abondance de calcaires subalpins et la présence constante de roches endogènes et un cortège de roches vertes alpines. La taille des galets est supérieure de 15 cm.

- La Crau du Luquier s'étend entre les deux axes NE-SW reliant à l'ouest le Grand Brahis, Terrusse et l'Étang des Aulnes, et à l'est les domaines du Merle, du Luquier et de Vergière.
- La Crau de Miramas se situe entre la Crau du Luquier et l'Étang de Berre. Les cailloutis constitués de galets sont à composition hétérogène (quartzite, granite, roche métamorphique, éruptive et calcaire). Les galets n'excèdent pas 20 cm de taille moyenne et présentent des altérations faibles des roches cristallines.

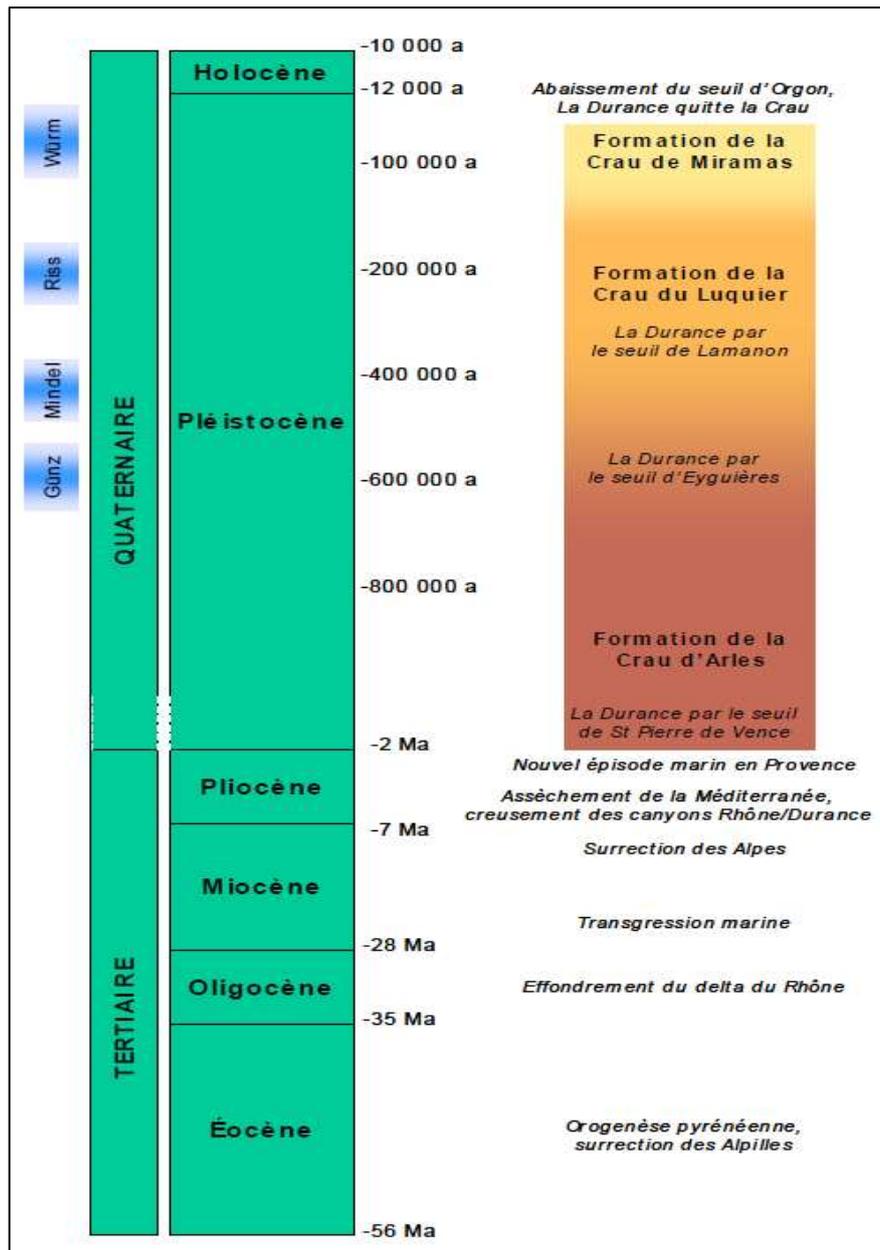


Figure 1-7: Échelle des temps géologiques montrant les étapes successives de la formation de la Crau. Source Wolff, (2010)

1.1.1.2.3 La pédogénèse anthropique

Jusqu'au XVI^{ème} siècle, la plaine était une steppe désertique utilisée essentiellement pour le pâturage des ovins. Au XVI^{ème} siècle, Adam de Craponne, un ingénieur hydraulicien provençal, lançait un projet d'aménagements hydrauliques afin de distribuer l'eau de la Durance dans la zone, dans le but initial de permettre l'alimentation en énergie des moulins utilisés pour la fabrication de la farine et de l'huile d'olive. L'irrigation traditionnelle (gravitaire) devenait alors possible sur la Crau. Les eaux de Durance, servant à l'irrigation, sont fortement chargées en limons qui enrichissent les sols en éléments fins modifiant leur

granulométrie ainsi que leurs propriétés acido-basiques. Une strate alluvionnaire filtrante, riche en minéraux, de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur s'est créée peu à peu. Les sols ainsi irrigués sont consacrés à la production d'un fourrage d'excellente qualité, le foin de Crau, ainsi qu'au pâturage.

Comme ce sol résulte de l'accumulation des limons transportés par les eaux de la Durance apportés par irrigation, son épaisseur est liée à la date de mise en place du réseau d'irrigation (voir Figure 1-8) et l'horizon d'accumulation est d'autant plus épais que l'irrigation est ancienne. En se basant sur l'examen des cartes de Cassini, de la carte d'état-major de 1875, et d'images de télédétection satellitaire (1975, 2009) une carte d'épaisseur des sols a été établie dans (Trolard et al., 2012).

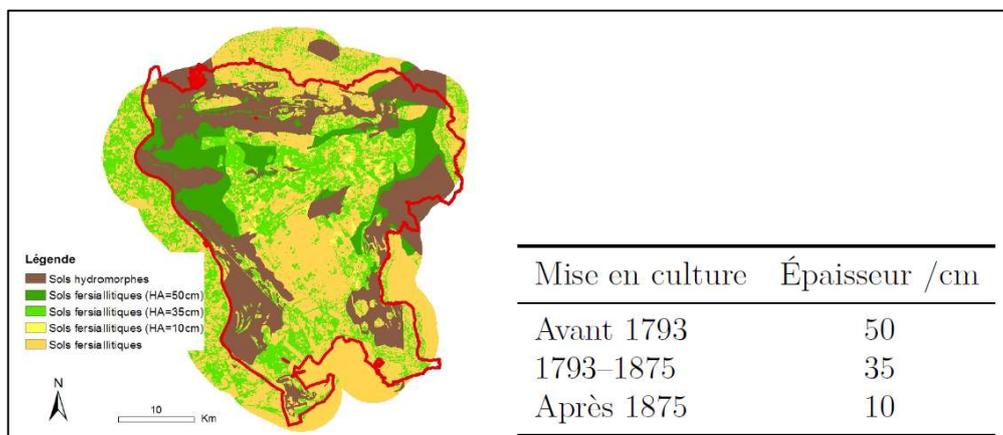


Figure 1-8: Carte de l'épaisseur des sols en fonction de la mise en place de l'irrigation. Source Trolard et al., (2012).

1.1.1.2.4 Les sols de la Crau

Trois types de sols peuvent être distingués en Crau (Andrieux, 1981; Bouteyre et Duclos, 1994):

1) Les sols non calcaires :

Ces sols recouvrent la plus grande partie de la Crau. Leurs caractéristiques varient entre des sols caillouteux et peu profonds (Crau du Luquier et de Miramas) et des sols moyennement profonds et peu caillouteux (Crau d'Arles). L'ensemble de ces sols sont fersiallitiques calcaïques avec présence d'un encroûtement calcaire (poudingue) appelé *taparas*.

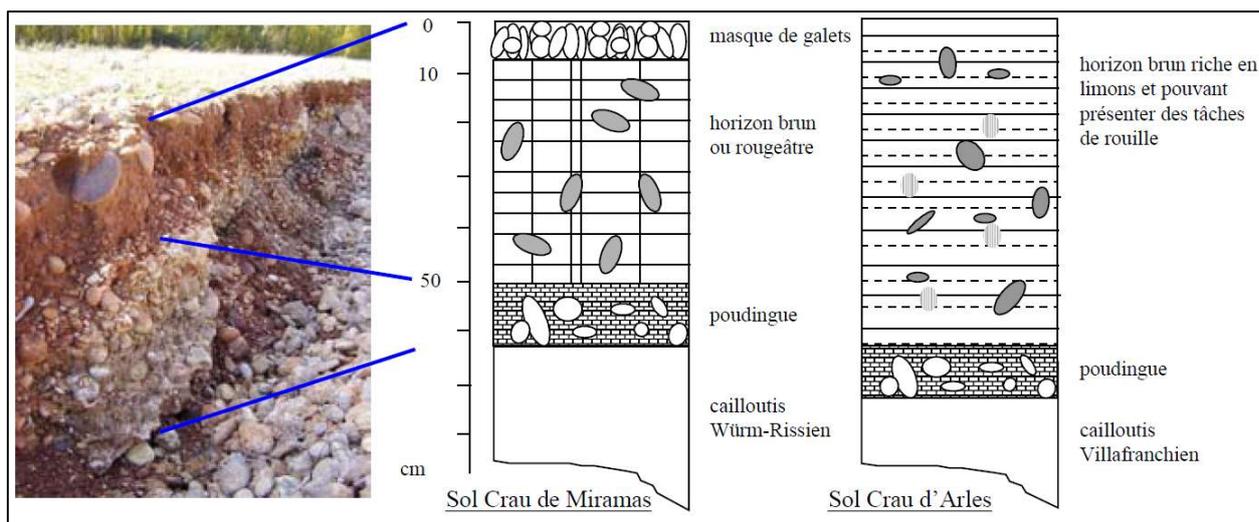


Figure 1-9: Profils types des sols. Source d'après Wolff, (2010).

Les sols non calcaires sont regroupés en deux familles, classés selon la couverture végétale qui y prospère.

- La Crau sèche ou le Coussoul,

Recouverte par des pelouses steppiques, la Crau sèche présente une couche des galets très grossiers à la surface. Les profils de sol comportent deux horizons, reposant sur un encroûtement calcaire très induré (Figure 1-9). Le profil du sol typique sous le coussoul situé dans la Crau de Miramas peut être décrit ainsi:

- 0 à 10 cm : 40 à 70 % de la surface sont des galets arrondis.
- 10 cm à 40 - 60 cm : horizon brun à brun rouge, lessivé et entièrement décalcifié, texture limono-sableuse, le taux de cailloux est de près de 40 %.
- en dessous de 40 à 60 cm, présence d'un poudingue appelé *taparas* reposant sur un horizon formé de galets enrobés dans une matrice sableuse dans laquelle la nappe phréatique circule en profondeur.

Pour la Crau d'Arles, le sol devient plus épais grâce aux dépôts limoneux correspondant aux alluvions récentes du delta du Rhône.

- La Crau humide ou les sols des prairies:

Ces sols ressemblent à ceux des « Coussouls » au niveau de la nature et de l'organisation, sauf que les limons provenant des eaux d'irrigation apportées pendant plusieurs décennies ou plusieurs siècles ont formé une couche limoneuse supplémentaire à la surface du sol. L'épaisseur de cette couche varie de 0 à 50 cm. Le rythme de ce limonage était d'environ 10 mm/an. Il s'est réduit jusqu'à 3-4 mm/an après la construction du barrage de Serre-Ponçon,

achevée vers 1960, qui piège les sédiments dans la retenue (Andrieux, 1981; Bessonnet, 2002).

Cette couche de limons est d'autant plus importante que l'âge de la prairie est élevé :

- Prairies jeunes : deux horizons successifs peuvent être distingués :
 - o Horizon limoneux, brun-gris, correspond à un dépôt argilo-limoneux qui est apporté par les eaux de l'irrigation, avec une épaisseur de 20-30 cm ; il possède un taux de cailloux d'environ 5% et est riche en systèmes racinaires.
 - o Horizon identique à celui supérieur des zones de Coussoul.
- Prairies âgées : les apports massifs des eaux d'irrigation ont conduit à une augmentation de la capacité de rétention et à la dégradation du profil du sol s'accompagnant de la présence de pseudogleys.

2) Les sols calcaires

Ils sont présents au nord-est sur une faible surface ainsi qu'à l'ouest près du Rhône. Leur profil typique est décrit comme suit :

- 0-20 cm : horizon brun-jaune à gris, texture allant de limoneuse à limono-sableuse, poreux, présence des cailloux.
- 20-70 cm : horizon avec une texture identique à l'horizon au-dessus, mais peu poreux et très caillouteux

3) Les sols Hydromorphes

Ces sont des sols humiques à gley au-dessus des cailloutis qui se localisent dans les dépressions de la Crau et en bordure des marais. On les trouve au sud de Saint Martin de la Crau, dans des petites zones à l'ouest d'Eyguières et à l'ouest de l'étang d'Entressen. Leur profil peut être décrit comme suit :

- 0-30 cm: gris foncé, texture fine de type limono-argilo-sableuse, pas de cailloux, milieu souple et poreux.
- 30-80 cm: gris avec taches d'ocre rouille, ayant la même texture que l'horizon précédent avec environ 10% de cailloux roulés.
- 80-120 cm: gris avec des taches jaune et ocre, compact et peu poreux, teneur en éléments grossiers d'environ 20%.
- à 120 cm : cailloutis encroûté.

1.1.1.3 La Nappe de Crau

La nappe de Crau est un aquifère libre dans sa très grande majorité. Elle s'étend sur une surface de 545 km² et présente une épaisseur variant entre quelques mètres et plusieurs dizaines de mètres dans les paléo-chenaux creusés par la Durance lors de la mise en place de la Crau au pliocène et au quaternaire. Son battement annuel varie fortement au niveau spatial et est corrélé à l'occupation du sol et aux pratiques d'irrigation : le battement est inférieur à 1 m dans les zones de coussoul, et peut dépasser 10 m dans les zones de prairies (BRGM, 1996). La nappe devient captive en bordure est du Rhône et à sa limite sud-ouest au niveau de la zone des marais du Vigueirat.

La nappe est séparée, par une ligne de partage des eaux souterraines, en deux bassins en correspondance avec les deux subdivisions géologiques de la Crau (Vieille Crau et Jeune Crau).

Le régime piézométrique de la nappe fluctue essentiellement au rythme des saisons d'irrigation (voir Figure 1-10) : les niveaux des eaux après la période d'irrigation (fin d'été) sont hauts et redeviennent bas en hiver (De Montety, 2008; Lionel et Purpan, 2004; Martin, 2008; Merot, 2007; Oliosio et al., 2013a; Rigaud et Shahzad, 2007; SymCrau, 2012; Tourmetz, 2010; Wolff, 2010).

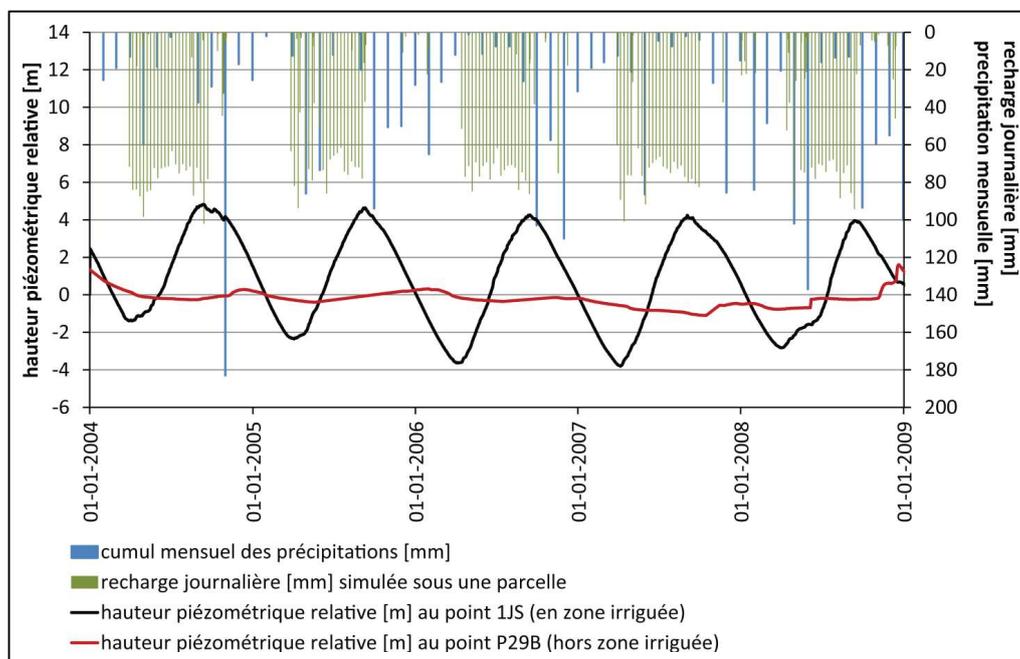


Figure 1-10 : Hauteurs piézométriques de la nappe dans une zone irriguée et une zone non irriguée exprimées par différence à la moyenne sur la période. Le piézomètre 1JS est localisé au Domaine du Merle, quelques kilomètres à l'ouest de Salon-de-Provence. Le piézomètre

P29B (hors zone irriguée) est situé dans les Coussouls en bordure nord-ouest de l'aéroport d'Istres – Le Tubé. Sont aussi représentés le drainage (journalier simulé au moyen du simulateur Crau décrit plus bas) sous une parcelle de prairie irriguée et la pluviométrie mensuelle au Domaine du Merle. Source : Oliosio et al. (2013b).

1.1.1.3.1 Délimitations de la nappe et sens d'écoulement

Les limites de la nappe de la Crau sont les suivantes (Guérin et al., 2009; SymCrau, 2014) :

- la limite amont imperméable de la nappe de la Crau se situe au niveau du seuil de Lamanon : dans une modélisation hydrogéologique, cette limite correspond à un flux traversant nul, depuis le seuil de Lamanon jusqu'au château de Beauregard,
- limites non étanches (i) au nord-est (au droit de Salon de Provence) qui assurent l'alimentation de la nappe, (ii) les exutoires naturels de la nappe qui génèrent des sources et marais (marais des Baux et source de Mouriès au nord-est et marais de Vigueirat au sud-ouest).
- limite à potentiel constant et imposé, au niveau de la Touloubre à l'Est et au niveau des marais à l'ouest et au sud.
- de Fos-sur-Mer à Arles, l'aquifère est recouvert par des alluvions limoneux peu perméables. La nappe devient ainsi captive et se prolonge sous le Rhône. Elle rentre également en contact avec le biseau salé au niveau de Fos-sur-Mer et devient saumâtre par endroit.

Les écoulements des eaux de la nappe se font selon 3 axes préférentiels qui empruntent les anciens paléo-chenaux de la Durance lors de la mise en place de la Crau (De Montety, 2008; Lionel et Purpan, 2004; SymCrau, 2012):

- un premier axe globalement Est-Ouest, depuis Eyguière jusqu'à Arles / Saint-Martin de Crau (« Crau d'Arles »),
- un second axe globalement Nord-Sud depuis Salon de Provence jusqu'à Fos-Sur-Mer (« Crau de Miramas »),
- un axe intermédiaire de direction Nord Est – Sud-Ouest (« Crau du Luquier »)

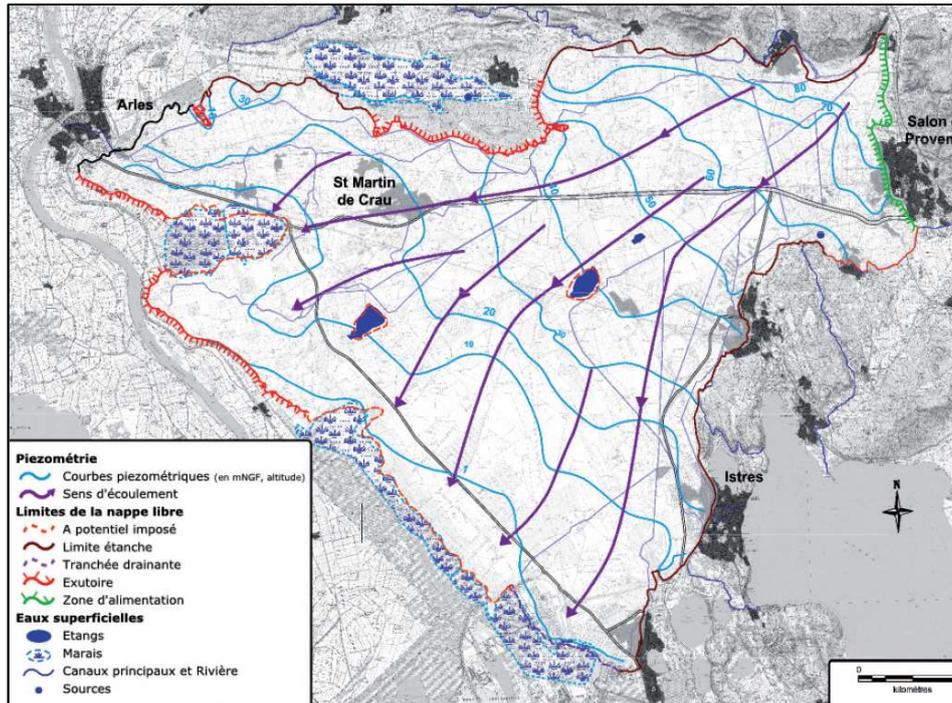


Figure 1-11 : Les écoulements et les conditions aux limites de la nappe de la Crau. Source (SymCrau, 2014).

1.1.1.3.2 Les caractéristiques physiques

La nappe de la Crau est de type poreux, ayant des perméabilités fortes dans la Crau würmienne (Crau de Miramas) et rissienne (Crau du Luquiers) et des perméabilités moyennes dans la Crau villafranchienne (Crau d'Arles). Les perméabilités s'échelonnent en général de 10^{-2} à 10^{-4} m.s⁻¹. Ainsi l'aquifère villafranchien présente globalement une porosité efficace (le coefficient l'emmagasinement) plus faible (près de 1.10^{-2}) que l'aquifère würmien pour lequel la porosité efficace est de l'ordre de 5.10^{-2} . Les transmissivités de la nappe sont en général comprises entre 5.10^{-3} m² s⁻¹ et 5.10^{-1} m² s⁻¹ (Bessonnet, 2002; De Montety, 2008; De Mordant De Massiac et al., 2011).

1.1.1.3.3 Le bilan hydrique

La recharge ou alimentation de la nappe de Crau vient des diverses origines suivantes (voir Tableau 1.2):

- *Les irrigations gravitaires utilisées pour la production de foin*

Grâce à l'infiltration des eaux provenant de la Durance apportées en excédent lors des irrigations par submersion des prairies de foin de Crau, l'irrigation forme la principale source d'alimentation de la nappe de Crau. Bien que les prairies irriguées n'occupent que 20% de la surface de la plaine de Crau, ce type d'alimentation contribue à 100-170 Mm³/an et représente plus de 70% du rechargement annuel de la nappe (Guérin et al., 2009; Martin, 2008; Merot, 2007; Mérot et al., 2011; Oliosio et al., 2013a; Rigaud and Shahzad, 2007; Tourmetz, 2010; Trolard et al., 2012). Il n'est pas réparti uniformément, se concentrant essentiellement dans la partie nord de la Crau. Des incertitudes sont cependant toujours existantes sur la contribution exacte de l'irrigation à la recharge, les données compilées dans (Oliosio et al., 2013a) montrant que la contribution de l'irrigation à la recharge totale annuelle de la nappe de la Crau est estimée entre 65% et 82 %.

Les quantités d'eau drainée sont estimées en moyenne annuelle à environ 1340 mm/an sous les prairies de sols hydromorphes, et à plus de 1700 mm/an sous les prairies d'autres types de sol (Trolard et al., 2012).

- ***Les précipitations,***

À l'échelle mensuelle, seuls les mois d'octobre à janvier présentent un bilan hydrologique naturel excédentaire : la recharge naturelle de la nappe par les pluies se ferait donc préférentiellement durant cette période. Elle varie très fortement au cours de l'année suivant la pluviométrie mensuelle. Cependant, du fait des spécificités du climat méditerranéen (très fortes intensités pluvieuses), des recharges ponctuelles dans le temps par les pluies peuvent avoir lieu lors des épisodes orageux quelle que soit la saison. La nappe de Crau est alimentée par les pluies avec un volume annuel estimé à près de 50 Mm³ (ANTEA, 2001; Mérot et al., 2011; Oliosio et al., 2013; SymCrau, 2014), cela correspond à une lame d'eau d'environ 90 mm (Oliosio et al., 2013).

- ***Les autres sources de recharge***

D'autres voies d'alimentation peuvent être identifiées. Bien que leur quantification reste délicate, elles sont considérées comme négligeables par rapport à la recharge naturelle par les pluies ou la recharge due à l'irrigation par submersion des prairies. Les autres sources de recharge ont été estimées par calcul à près de 22 Mm³ par le BRGM (BRGM 1995, Guérin et al. 2009, Mérot et al., 2011; Oliosio et al., 2013a):

- les recharges souterraines par échange avec d'autres aquifères et en particulier un aquifère miocène sous jacent ;
- les infiltrations par ruissellement depuis le massif des Alpilles en limites nord de la nappe de la Crau ; ces ruissellements éventuels s'infiltrent cependant sur les zones de piémont qui ne sont pas incluses dans l'aquifère de la Crau ;
- les infiltrations à partir des réseaux de canaux qui distribuent l'eau d'irrigation. Ces canaux sont très majoritairement en terre et peuvent donc contribuer à la recharge de la nappe. Aucune quantification n'est disponible. Pour une zone méditerranéenne de viticulture sur des sols pentus, Dages et al. (2009) ont montré que la recharge souterraine concentrée à partir d'un réseau de fossés était équivalente à la recharge diffuse au niveau des parcelles lors des épisodes pluvieux d'automne. Le contexte est cependant différent et on ne peut pas transposer directement ces résultats aux réseaux de canaux présents en Crau.

	BRGM* (1995)	Antea** (2001)	SymCrau (2009)
Réserve estimée	550	–	–
<u>Entrées</u>			
Pluie	57	54	De l'ordre de 50 à l'exclusion des années exceptionnelles
Irrigation	117	164	De l'ordre de 100 à 240 selon les méthodes d'estimation
Souterrain	22***	–	Aucune valeur de débit trouvée dans la littérature
<u>Sorties</u>			
Naturelles	151	167	157 (synthèse des données bibliographiques existantes)
Eau potable	21	26	27,5 (estimation 2003-2006), en augmentation
Industrie	15	12	16 (estimation 2003-2006), stable
Agriculture	9	12	24 (au minimum, une part significative des ouvrages n'étant pas référencée)
Total	196	218	

Tableau 1.2 : Bilan hydrique annuel de l'aquifère de Crau (chiffres en millions de m³ ou hm³).
Source Oliso et al., (2013a). *** Calculé pour équilibrer le bilan.

Les pertes d'eau dans la nappe de Crau peuvent se faire sous deux formes principales : les prélèvements par pompage et les exutoires naturels.

- *Les prélèvements dans la nappe*

La moyenne annuelle des prélèvements dans la nappe de Crau est de près de 92 millions de m³ (BRGM, 1995; ANTEA, 2001; Oliosio et al., 2013a; SymCrau, 2012, 2014) dont :

- l'eau potable pour 14 communes : de 21 à 29 millions de m³/an, les plus importants (voir Tableau 1.3) sont situés en limite Est de la Crau (Salon de Provence, Miramas, Istres, Port-de-Bouc, Fos/Mer),
- les activités industrielles : de 12 à 17 millions de m³/an,
- les activités agricoles : de 9 à 12 millions de m³/an.

Il faut noter que si les prélèvements pour l'eau potable ou les activités industrielles peuvent être connus relativement précisément à partir des déclarations des exploitants, en revanche l'estimation des prélèvements pour les irrigations agricoles peut être imprécise, du fait de

Nom de l'Agence	Nom usuel	Volume en m ³ en 2000
* Mr LE MAIRE DE PORT SAINT Louis	- La Pissarotte	1 138 800
* Mr LE MAIRE DE ARLES	- Arles Saint-Hyppolyte	4 266 120
* Mr LE MAIRE DE ARLES	- Mas Thibert	289 080
* AUREILLE	- Aureille	236 520
* EYGUIERES 2	- Eyguières 2	411 720
* Mr LE MAIRE DE	- Grans	280 320
* Mr LE MAIRE DE MIRAMAS	- Miramas Sulauze	3 171 120
* Mr LE MAIRE DE	- Istres	4 292 400
* Mr LE MAIRE DE ST	- Saint-Martin de Crau Z.I.	43 800
* Saint-Martin de Crau Lyon	- Saint-Martin de Crau Lyon	823 440
* FORAGE ZAC de	- Forage ZAC de	1 752 000
* BASE AERIENNE 701 M.G.40-701	- SS BA	210 240
* Mas de Payant	- Mas de Payant	113 880
* EGUIERES 1	- SCE des Bormes	219 000
* Salon	- Salon	219 000
* Entressen	- Entressen	254 040
* Port de Bouc	- Port-de-Bouc	2 890 800
* FOS	- Fos-sur-Mer	2 365 200
* PAM Ventillon	- PAM Ventillon	2 628 000
	- Valboise	0
	- Martigues 1	219 000
	- Martigues 2	219 000
	TOTAL	26 043 480

l'absence de déclaration de certains pompages.

Tableau 1.3 : Volumes d'eau utilisés en Alimentation en Eau Potable par les communes de la plaine de Crau. Source : ANTEA, (2001).

Nous ne disposons pas de données pour l'estimation des pompages par les particuliers, mais le volume est a priori négligeable.

1.1.2 Usage des sols, agronomie et irrigation sur la Crau

1.1.2.1 Usage des Sols

Les principales occupations du sol dans la plaine de la Crau peuvent se résumer ainsi :

- *Communes et réseaux routiers*

L'urbanisation croissante en accompagnement du développement industriel, conduit à une population totale sur la Crau qui approcherait les 250 000 habitants, avec une distribution hétérogène. Les zones de coussoul sont peu artificialisées ; inversement, les zones industrielles au sud et la proximité de l'Etang de Berre au sud-est forment des zones largement urbanisées. Ces zones correspondent aux villes suivantes : Arles, Salon-de-Provence, Istres, Fos sur Mer et Port Saint Louis du Rhône, ainsi qu'à des villages comme Mouriès, Aureille, Eyguière, St Martin de Crau, Raphaële et Entressen ...

Les réseaux routiers traversant la Crau sont les suivants :

- l'autoroute A54, qui relie St Martin de Crau à Salon de Provence, ainsi que l'Espagne à l'Italie.
- trois anciennes routes nationales principales : La N113 (Arles – St Martin de Crau), la N568 (Arles – Fos) et la N569 (sert la bordure ouest de l'Etang de Berre).
- les routes secondaires, qui sont à proximité des pôles urbains.

- *Zones industrielles*

L'aménagement du port de Fos-sur-Mer, pendant les années 1960, a eu un impact important sur le développement industriel de la Crau ; il a favorisé la mise en place des activités industrielles couvrant une surface près de 10000 hectares (Comité du Foin de Crau, 2001).

- *Zones militaires*

De nombreuses zones d'activités militaires se trouvent sur le territoire de la Crau. Les deux implantations les plus importantes sont la base aérienne au nord d'Istres et l'"Etablissement du matériel de l'Armée de Terre" à Miramas qui couvrent une superficie de 2100 ha (Comité du Foin de Crau, 2001).

La Crau est ainsi devenue la plus importante région française pour les essais en vol, possédant le seul site européen pour les activités spatiales, équipé d'une piste de 5 000 mètres.

- *Zones naturelles et agricoles*

Une grande variété d'activités agricoles existe sur la Crau telle que l'élevage d'ovin et de bovin, ainsi que la culture de foin, les vergers et le maraîchage. Les premières cultures mises

en place associaient vignes, oliviers et céréales, puis se développèrent au 19^e siècle les prairies de fauche

À partir des années 1945-1950, la mise en culture s'est fortement accélérée et les anciennes cultures de vignes, oliviers et céréales, peu irriguées, ont été remplacées par des cultures irriguées par pompage direct dans la nappe et non plus par le réseau d'irrigation (vergers, maraichage).

Le Tableau 1.4 montre que le foin de Crau et les Coussouls occupent une proportion d'environ 45% de la surface totale de la Crau.

Après la production de foin de Crau, les vergers et les céréales sont les principales cultures agricoles en termes de surface cultivée. Sur les exploitations de foin de Crau, les cultures se répartissent ainsi :

- prairies (essentiellement irriguées) : 50%,
- parcours (essentiellement coussouls) : 40%,
- céréales : 6%,
- arboriculture : 2,5%,
- vignes : 1%,
- maraichage : 0,5%.

	Superficies en ha	% de la superficie
Espaces agricoles		
Foin	15 770	26
Coussouls	11 384	18,5
Vergers	3 803	6
Céréales	3 760	6
Légumes	2 123	3,5
Parcours	490	1
Vignes	375	0,5
Total	37 705	61,5
Espaces urbains et industriels		
Emprise militaire	3 635	6
Urbanisation continue	1 909	3
Urbanisation diffuse	1 437	2,5
Superstructures et aéroport	822	1,5
Emprise industrielle	796	1,5
Jardins	618	1
Total	9 217	15,5
Espaces naturels		
Végétation naturelle	8 926	14,5
Marais	921	1,5
Friches	3 827	6
Espaces en eau	609	1
Total	14 283	23
Total général	61 205	100

Tableau 1.4 : Occupation du sol dans la Crau, d'après ANTEA 2001, source Martin, (2008).

1.1.2.2 Les prairies AOP

La production des prairies permanentes (le foin de Crau) représente la principale activité agricole sur la plaine de la Crau. Elle occupe aujourd'hui près de 13 500 hectares et concerne plus de 220 producteurs (<http://foindecrau.com> comité de foin de la Crau). Ce foin est destiné à l'élevage des cheptels locaux (ovins, chevaux..), ainsi qu'à l'expédition dans toute la France et à l'étranger, en particulier en Italie, en Suisse, Allemagne, Angleterre, Irlande, Malte, Emirats du Golfe Persique, et l'Arabie Saoudite, pour l'élevage de chevaux.

Les prairies de foin bénéficiant de l'AOP « Foin de Crau » ne peuvent être maintenues qu'avec l'irrigation gravitaire, appliquée régulièrement pendant une saison d'irrigation qui s'étend de mars à octobre pour maintenir l'humidité nécessaire à la pousse et croissance des foins sous un climat sec. Avec ce mode spécifique d'irrigation, qui consiste en une

submersion temporaire des parcelles nivelées avec une hauteur d'eau d'environ 80 à 120 mm pendant quelques heures, seulement 20-25% de la quantité d'eau amenée est réellement stockée dans les sols et réutilisée par les foins par l'évapotranspiration. L'eau apportée non consommée est restituée par infiltration vers la nappe souterraine. Cela indique que les prairies de foin de Crau constituent une importante ressource pour l'eau souterraine (Saos, 2003; SymCrau, 2014).

Les prairies de foin de Crau se caractérisent par :

- une composition très équilibrée et particulière, mélange de graminées et de légumineuses (dactyle, fétuque, trèfle, vesse, ...), qui a bénéficiée d'un périmètre de protection depuis 1941, d'une marque syndicale en 1947, d'un label depuis 1953 et est maintenant reconnue par l'AOC « foin de la Crau » depuis 1997. Cette composition lui donne une très bonne valeur alimentaire permettant son exportation à travers l'Europe (Wolff, 2010), voir la Figure 1-12
- la pratique de l'irrigation gravitaire par submersion selon la répartition d'un tour d'eau tous les huit à douze jours, 15 fois environ pendant la saison d'irrigation, avec des volumes d'eau totaux apportés sur les parcelles entre 15000 à 20 000 m³ par hectare (Mérot et al., 2011),
- la production de foin se fait en 3 coupes toutes les 8 semaines à partir du début de la saison d'irrigation, avec des rendements d'environ 8 à 10 tonnes/ha/an (Mérot et al., 2011),
- la "4ème coupe" en automne et en hiver est allouée au pâturage des ovins (Wolff, 2010).

Le label de qualité AOC (Appellation d'Origine Contrôlée) et AOP (Appellation d'Origine Protégée) depuis 1997 pour les foins de Crau est le premier et toujours le seul donné à un aliment pour animaux. Les règles devant être respectées ont été précisées dans le décret de 1999 relatif à l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau ». Ces règles portent sur la mise en place de la prairie, la composition floristique, l'irrigation, la fertilisation, les rendements, la récolte et le stockage :



Figure 1-12: Principales plantes présentes dans le foin de Crau AOC. D'après Comité de foin de Crau.

- 1) les foins doivent provenir de prairies situées dans l'aire géographique des communes suivantes : Arles, Aureille, Eyguières, Fos-sur-Mer, Grans, Istres, Lamanon, Miramas, Mouriès, Saint-Martin-de-Crau, Salon-de-Provence,
- 2) la composition floristique est définie comme suit :
 - espèces obligatoirement et majoritairement présentes ; comme le Fromental, le Dactyle pelotonné, le Trèfle violet des prés, le Trèfle rampant,
 - espèces dont la présence exclut du bénéfice de l'appellation d'origine comme la Laïche, la Scirpe en jonc, la Prèle,...
- 3) les prairies doivent être conduites dans les conditions suivantes :
 - implantation de la prairie à partir d'un semis de luzerne, seul ou en mélange avec des graminées et des légumineuses,
 - irrigation de mars à octobre, tous les huit à douze jours, par submersion à partir des fossés d'arrosage. La prairie est submergée pendant plusieurs heures, selon la répartition du tour d'eau,
 - fertilisation azotée limitée à soixante unités par hectare et par an d'azote minéral (fumure organique exceptée),

- 4) la production ne dépasse pas dix tonnes par hectare et par an pour l'ensemble des trois coupes. Les trois coupes doivent être achevées respectivement avant le 31 mai, avant le 25 juillet et avant le 30 septembre. Le foin ne doit pas rester sur le champ plus de cinq jours pour la première et la troisième coupe, plus de trois jours pour la deuxième coupe.
- 5) la production des prairies commence 2 ans après son implantation mais le classement comme AOC ne sera appliqué qu'après 5 ans.

La localisation géographique des prairies en Crau est donnée sur la Figure 1-13.

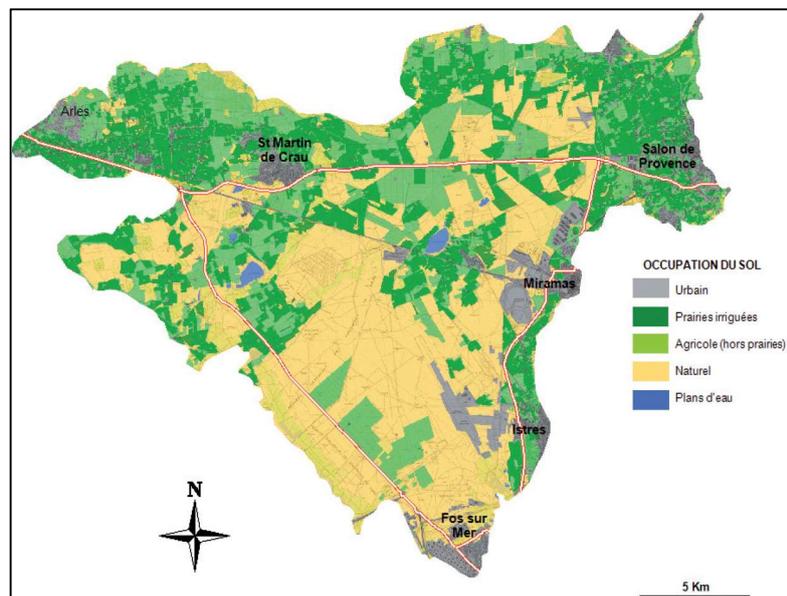


Figure 1-13, Carte d'occupation du sol de la plaine de Crau. Source : SymCrau, (2014)

1.1.2.3 Le système d'irrigation sur la plaine de la Crau

1.1.2.3.1 Aspects historiques

Le système d'irrigation principal en Crau repose sur un réseau de canaux à surface libre qui distribuent l'eau prise dans la Durance aux différentes parcelles agricoles, parmi lesquelles les prairies de foin de Crau qui sont alors irriguées par submersion. Ce système traditionnel repose sur les canaux conçus et construits par Adam de Craponne (1526-1576) au XVIème siècle, qui est précisément décrit par (Michel, 2011) : les principales caractéristiques de ce système d'irrigation décrites dans la suite de cette section sont issues de cet auteur. Initialement conçu pour permettre l'alimentation en eau des moulins à blé et à olives, ainsi que l'irrigation des oliviers autour de la ville de Salon de Provence, on peut distinguer trois phases dans la construction de l'ensemble de l'infrastructure.

- **La phase initiale des travaux (1554-1559)** : la première phase de construction des canaux s'étalera entre août 1554, date à laquelle A. de Craponne obtient l'autorisation de dériver les eaux de la Durance pour les conduire en Crau, et avril 1559, où les eaux arrivent à Salon de Provence le 29 avril. Ces travaux incluent :
 - La prise d'eau en Durance en amont de l'abbaye de Silvacane (au rocher de « Pié-Bérard », à la limite entre les communes de la Roque d'Anthéron et de Saint Estève Janson dans les Bouches du Rhône). Du fait des divagations hydrauliques de la Durance, cette prise a pu par la suite être déplacée. Sur la carte de Cassini (XVIII^{ème} siècle), on situe la prise au niveau des ruines du château de Janson, alors que sur la carte d'état-major (1820-1866), on la situe plus en aval au lieu-dit Gontard (www.geoportail.gouv.fr) ;
 - Le canal maître qui achemine l'eau depuis la Roque d'Anthéron jusqu'au territoire de Lamanon, incluant des dérivations locales desservant les communes de Mallemort et d'Alleins ;
 - Le canal principal qui achemine l'eau de Lamanon jusqu'à la ville de Salon de Provence
- **La phase de développement (1559-1571)** : plusieurs extensions sont construites lors de cette période :
 - le canal de Salon à Grans,
 - la branche « Lamanon-Eyguières-Istres »,
 - la branche « Salon-Pelissanne-Lançon »

Michel (2011) propose une estimation du débit maximal transitant dans les différentes branches ainsi que les superficies des zones irrigables à partir des différentes branches (voir Figure 1-14). Il souligne cependant que l'estimation de ces dernières est imprécise, car dépendant de la culture mise en place et de la fréquence des irrigations. Par ailleurs, il estime qu'un débit de 250 l s^{-1} permet d'irriguer annuellement 250 ha de prairies.

La construction de la branche de Eyguières à Arles (1581-1585) : cette partie de « l'œuvre de Craponne », si elle a été initialement proposée par A. de Craponne en 1561, ne sera réalisée qu'après sa mort. Cette construction s'accompagne de l'augmentation du gabarit du canal maître d'A. de Craponne.

L'ensemble de ces canaux est visible sur la carte de Cassini reprise sur la Figure 1-14.

Des problèmes de gestion hydraulique (régulation des débits et des hauteurs d'eau dans les canaux principaux, surveillance des prélèvements pour irrigation,) apparaissent rapidement et génèrent des conflits d'usage, les usagers les plus en aval manquant fréquemment d'eau, en particulier sur les branches de Eyguières à Arles d'une part, et de Salon à Lançon d'autre part. Cependant, cette infrastructure hydraulique va se développer régulièrement jusqu'à l'aménagement hydroélectrique de la Durance et le déplacement de la prise d'eau dans le canal usinier EDF de Serre-Ponçon à l'étang de Berre après la mise en service du barrage de Serre-Ponçon en 1960 (<http://www.documentation.eaufrance.fr/entrepotsOAI/AERMC/R333/87.pdf>), voir la Figure 1-15 qui montre l'évolution des débits prélevés en Durance d'après (Michel, 2011).



Figure 1-14: Visualisation des différentes branches du canal de Craonne sur la carte de Cassini (XVIIIème siècle).

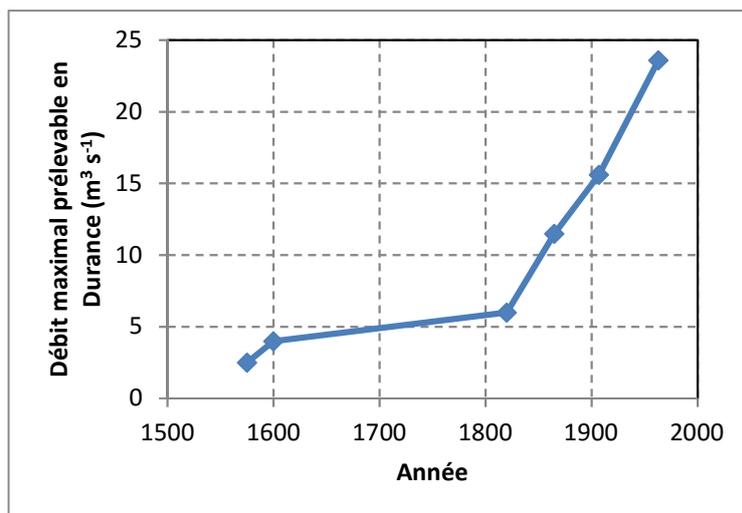


Figure 1-15 : Evolution du débit maximum prélevable en Durance par le canal de Craponne, d'après Michel (2011). Le dernier point (1963) correspond à la mise en service de l'aménagement hydroélectrique de la Durance et à un prélèvement dans le canal usinier EDF.

Branche concernée	Débits (l s ⁻¹)	Surface irrigable (ha)
Canal maître (Durance-> Mallemort)	~ 2 500	1 100
Canal maître (Mallemort – Lamanon)	~ 2 100	
Branche Lamanon-Eyguières-Istres	~1 000	1500
Canal principal (Lamanon-Salon de Provence)	~ 1 600	400
Branche de Salon à Grans	~250	
Branche Salon-Pelissanne-Lançon	500	400

Tableau 1.5 : Estimation des débits maximum transitant dans les différentes branches du canal de Craponne avant la mise en service de la branche de Eyguières à Arles, ainsi que les surfaces irrigables par chacune de ces branches, d'après (Michel, 2011). Les estimations des débits sont donnés en «moulant » par Michel (2011), on prend comme facteur de conversion 1 moulant = 250 l s⁻¹.

Ce système de canaux, qui constitue encore aujourd'hui la structure de l'irrigation en Crau, a été complété par d'autres infrastructures également décrites par Michel (2011). On peut citer les principales :

- un ensemble de canaux de drainage visant à évacuer les eaux de surface hors de la Crau, en particulier les eaux issues des zones de marais situés au nord (Tarascon), à l'est (« marais des Baux ») et au sud (« marais des Chanoines et de Meyranne) d'Arles ; l'ensemble des eaux drainées rejoint le canal du Vigueirat ou le canal de la Vidange (ou du Colmatage) situés en limite ouest de la Crau et qui se rejoignent au niveau des aménagements portuaires au nord de Fos sur Mer ;
- le canal dit « de Boisgeline » dont la construction a été impulsée par l'archevêque Jean de Dieu Raymond de Boisgeline de Cucé à la fin du XVIIIème siècle. Ce canal inclut le canal des Alpines septentrionales, qui conduit les eaux prises initialement dans la Durance au niveau de la commune de Mallemort jusqu'à Tarascon par le piémont nord du massif des Alpilles (hors du territoire de la Crau), ainsi que le canal du Congrès qui alimente la plaine de la Crau à partir de la commune de Lamanon dès le mois de mai 1787.

Si les deux infrastructures principales (canal de Crau et canal de Boisgeline) ne sont pas interconnectées dans un premier temps, la branche d'Arles du canal de Crau voit son débit soutenu par de l'eau en provenance du canal de Boisgeline à partir de 1800. Suite à la mise en service du barrage de Serre Ponçon en 1960, les eaux qui alimentent ces deux infrastructures sont prélevées dans le canal usinier d'EDF de Serre-Ponçon à l'étang de Berre et sont réparties dans les différents canaux de Crau grâce aux partiteurs de Lamanon, d'Eyguières et du Merle.

1.1.2.3.2 Les évolutions récentes au XXème siècle

Les évolutions récentes (seconde moitié du XXème siècle) de l'alimentation en eau des canaux de Crau et de Boisgeline s'insèrent dans le contexte de l'aménagement hydroélectrique de la vallée de la Durance (et du Verdon) qui visent un triple objectif :

- pérenniser les prélèvements d'eau dans ces deux rivières pour garantir les usages agricoles et pour l'alimentation en eau potable dans les départements du Vaucluse, des Bouches du Rhône et du Var,
- réguler les débits de crue de la Durance et du Verdon afin de protéger les populations et les infrastructures ;
- valoriser le potentiel énergétique du système Verdon-Durance (Michel, 2011).

Les réglementations suivantes ont établi les règles de prélèvements (en débit, en volume annuel et en répartition annuelle) de l'eau en Durance à destination des usages agricoles et pour l'alimentation en eau potable :

- **la loi d'avril 1923** vise à la constitution de réserves sur la Durance pour permettre la dérivation de volumes supplémentaires ;
- **La Convention du 24 Novembre 1953** (<http://www.irrigation-ced-durance.fr/component/edocman/4-convention-24-novembre-1953-ministere-de-l-agriculture/edocman-sef-document-download>): en 1953 afin d'augmenter les ressources en eau disponibles surtout durant les périodes sèches et réduire l'effet des irrégularités de régime du cours d'eau, un programme d'aménagement de la Durance est lancé, traduit par la construction du barrage de Serre-Ponçon (construction et exploitation par EDF). Une convention entre le Ministère de l'Agriculture et EDF est alors établie. Elle fixe le principe d'une réserve agricole au sein de la retenue du barrage de Serre-Ponçon d'un volume maximal de 200 Mm³ afin d'assurer l'alimentation des eaux des canaux d'irrigation de la Basse Durance. Cette convention définit aussi les conditions dans lesquelles la réserve agricole pourra être mobilisée (répartition annuelle, ...)
- **Loi du 5 Janvier 1955** (<http://www.irrigation-ced-durance.fr/component/edocman/5-loi-5-janvier-1955-amenagement-de-la-durance/edocman-sef-document-download>) : la loi 55-6 « relative à l'aménagement de la Durance » définit dans son article 4 le débit maximal prélevable en aval de Cadarache, fixé à 114 m³ s⁻¹, ainsi que les modalités de répartition de cette dotation entre les différents canaux (article 5). La distribution de l'eau aux exploitations est gratuite, mais modulable au cours de l'année : maximale en été, progressive au printemps, décroissante en automne et nulle en hiver.

1.1.2.3.3 Fonctionnement actuel

En Crau, les agriculteurs peuvent adhérer à de nombreuses structures professionnelles. Ces structures peuvent être classifiées en trois catégories :

- Les regroupements de la profession agricole : Chambres d'Agriculture, Syndicat de la propriété agricole, Centre Départemental des Jeunes Agriculteurs. . .
- Les regroupements de producteurs locaux : Comité du Foin de Crau, Syndicat du Mérinos d'Arles,...
- Les regroupements d'irrigants : Associations Syndicales d'irrigation qui peuvent être des Associations Syndicales Autorisée (ASA), Libres (ASL) ou Forcées (ASF), voir Figure 1-16.

Ces derniers sont créés avant 1865, adhérents au Syndicat mixte de gestion des associations syndicales du pays d'Arles et Camargue qui assure la partie administrative et financière regroupant une quarantaine d'Associations de Crau et de Camargue. Ils assurent la distribution de l'eau à la parcelle selon un droit fixé, en contrôlant le respect des droits d'eau ; ils permettent de gérer les tours d'eau, les quantités utilisées et les aspects financiers liés à l'irrigation en fonction de la taille de l'exploitation par les producteurs agricoles eux-mêmes. En général, la somme de tous les droits d'eau des différentes ASA correspond au droit de prélèvement global dans le canal EDF.

Les droits d'eau ont été définis sur la base de $0,0012 \text{ m}^3/\text{ha/s}$ ($1,2 \text{ l/ha/s}$) il y a plusieurs siècles et sont restés les mêmes jusqu'à maintenant (Beltrando, 2015a). Ils sont appliqués à 100% en été pendant la saison sèche. Cette allocation est diminuée en début et en fin de saison d'irrigation (mois d'avril et septembre), seulement 60% de l'eau allouée étant alors disponible pour l'irrigation (Ballihaut, 2009; Beltrando, 2015b; Mailhol and Merot, 2008; Oliosio et al., 2013a).

Les producteurs de foins de Crau, qui adhèrent à une ASA, paient leur cotisation annuelle calculée en fonction de la surface irrigable de leur propriété : c'est la « cotisation au rôle ». La cotisation au rôle peut varier d'une ASA à l'autre, et va de 30 à 160,83 € à l'hectare souscrit, voir Tableau 1.6. Cette variation dépend du choix des arrosants et de leur implication dans l'entretien, total ou partiel, du réseau (désherbage, faucardage, ...), la partie non prise en charge par l'agriculteur étant alors prise en charge par l'ASA. La cotisation doit également contribuer à la rémunération du personnel de l'association : directeur du syndic, secrétaire, garde canal, etc... Les caractéristiques des principales associations syndicales d'irrigants en Crau sont données dans le Tableau 1.7.

Associations Syndicales	Superficie souscrite en ha	Cotisation En euro/ha/an	Montant Hors Taxe	Montant T.T.C. 5,5 %
A.S.L des Biens Neufs	30	30	900	945,5
A.S. de la Haute Crau	30	150	4500	4747,5
A.S. des Alpines de Salon	30	114	3420	3608,1
A.S. Eyguières	30	105	3150	3323,25
A.S. Grans	30	125	375	395,6
A.S Chanoines	30	21	630	664,6
A.S.L Canal Joly	30	30	900	945,5

Tableau 1.6: Coût calculé de l'irrigation selon le type d'AS pour une superficie souscrite de 30 ha. Source Djouabi, (2004).

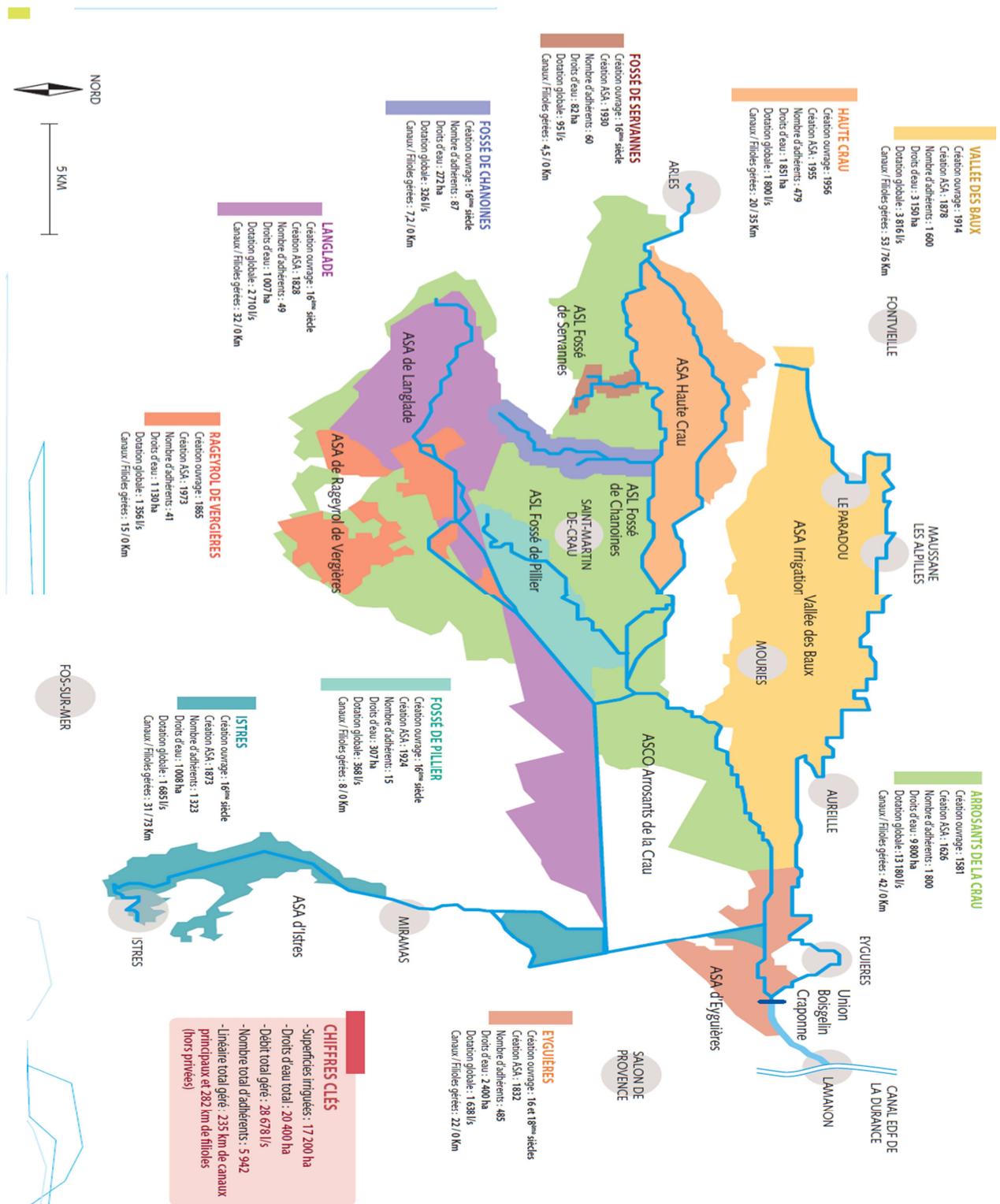


Figure 1-16: Les différents Associations syndicales d'Arrosant à la Crau. Source « Contrat de canal Crau sud Alpilles »

N°	NOM	SURFACE IRRIGUEE et DU SYNDICAT (ha)	DEBITS	ORIGINE DE L'EAU
1	Œuvre Générale de Craponne	<i>Syn: 60000 Irr: 17500</i>	<i>23 638 l/s</i>	<i>Canal commun Boisgelin-Craponne Canal E.D.F</i>
2	A.S Arrosants de la Crau	<i>Syn: 9800 Irr: 8000</i>	<i>16 480 l/s</i>	<i>Canal commun Boisgelin-Craponne Partiteur d'Eyguières</i>
3	A.S.L. du Mas Pilier	<i>Syn: - Irr: -</i>	<i>350 l/s</i>	<i>Branche d'Arles du canal de Craponne</i>
4	A.S.A des Alpines de Salon	<i>Syn: 7050 Irr: 700</i>	<i>670 l/s</i>	<i>Canal des Alpines à Salon</i>
5	A.S.A de la vallée des Baux	<i>Syn: 2800 Irr: 2000</i>	<i>3 816 l/s</i>	<i>Canal commun Boisgelin-Craponne Partiteur d'Eyguières</i>
6	A.S.A des arrosants d'Eyguières	<i>Syn: 1800 Irr: 1200</i>	<i>1 630 l/s</i>	<i>Canal commun Boisgelin-Craponne Partiteur d'Eyguières</i>
7	A.S.A de Craponne à Istres	<i>Syn: 1200 Irr: 1000</i>	<i>3 300 l/s</i>	<i>Branche d'Istres du canal de Craponne</i>
8	A.S.A du canal de Langlade	<i>Syn: 2100 Irr: 100</i>	<i>2 650 l/s</i>	<i>Canal du Congrès et Canalet</i>
9	A.S.A du Rajeirol de Vergières	<i>Syn: 1356 Irr: 1200</i>	<i>1 350 l/s</i>	<i>Canal de Craponne-la branche d'Arles et le canal du Congrès</i>
10	A.S.A de Haute Crau	<i>Syn: 1500 Irr: 1500</i>	<i>3 000 l/s</i>	<i>Branche Arles du canal de Craponne</i>
11	A.S.A de Miramas	<i>Syn: - Irr: -</i>	<i>1 341 l/s</i>	<i>Canal du Congrès Partiteur du Merle</i>
12	A.S.L. des Chanoines	<i>Syn: 260 Irr: 260</i>	<i>312 l/s</i>	<i>Branche Arles du canal de Craponne</i>

Tableau 1.7 : présentation quelques Associations syndicales dans la plaine de Crau. Source Djouabi, (2004).

1.1.3 Les changements globaux sur le territoire de la Crau

1.1.3.1 Changements d'usage des sols

Les coussouls sont les surfaces qui ont le plus disparu sur la plaine de Crau, en particulier dans la partie Nord : ils ont perdu 80% de leur surface atteignant près de 8900 ha en 2007 alors qu'ils occupaient près de 50000 ha au début de la construction des premiers canaux d'irrigation au XVI^e siècle (Beltrando, 2015b; Bulot et al., 2014; Devaux et al., 1983). Dans le même temps, les surfaces irriguées passent de 0 ha à plus de 20000 ha (cf. Figure 1-17). Les zones de coussoul ont été transformées en zones de cultures à un rythme de près de 2 km² par an depuis cette construction (Cheylan, 1998). L'implantation des cultures sur les Coussouls débute par des vergers, des vignes et des céréales. Les prairies de fauche se développent à partir du 19^e siècle.

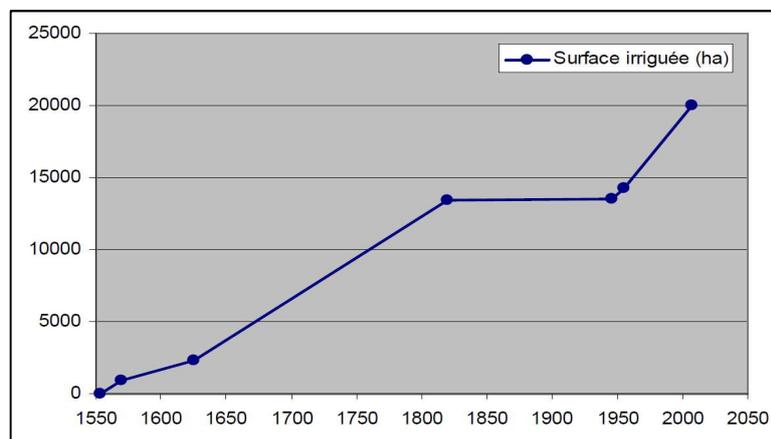


Figure 1-17: Développement des surfaces irriguées à partir de la construction de l'œuvre de Craponne au XVI^e siècle. Source (Wolff, 2010).

Le développement économique et la construction de la Zone Industriale-Portuaire (ZIP) de Fos-sur-Mer durant les années 1970-1980, a attiré plus de 20 000 personnes avec la création de nombreux emplois, notamment dans la partie sud et sud-ouest de la Crau : Fos/mer, Istres, Miramas, ainsi que dans la partie centrale de Saint-Martin de Crau, ce qui a nécessité des aménagements importants incluant des infrastructures collectives diverses : routières, commerciales, de loisirs (Beltrando, 2015b; Martin, 2008).

A la fin des années 1980, la destruction des Coussouls est due au développement de cultures industrielles (maraîchage, arboriculture fruitière) et par l'installation de structures industrielles et militaires. La Base Aérienne d'Istres occupe, avec ses annexes, près de 2 400 ha de coussoul, le centre de traitement biologique des résidus urbains une surface de 80

ha et la gare de triage de Miramas une surface de 200 ha (Beltrando, 2015b; Bulot et al., 2014; Martin, 2008).

Les travaux dans le cadre du programme Astuce et Tic (De Mordant De Massiac et al., 2011) ont montré que l'urbanisation sous différentes formes avait réduit les surfaces agricoles de plus de 800 ha et les espaces naturels de 790 ha entre 1997 et 2009. Des projections futures ont été effectuées prévoyant que près de 600 ha de prairies irriguées seraient ouverts à l'urbanisation à l'horizon 2020-2025 (De Mordant De Massiac et al., 2011; SymCrau, 2014).

1.1.3.2 Changements climatiques

La disponibilité de l'eau pour l'irrigation dans la région est influencée par les changements climatiques, incluant l'irrégularité intra et interannuelle des précipitations et la sécheresse estivale, créant des stress qui menacent l'écosystème (Devaux et al., 1983; Dutoit et al., 2011; Henry et al., 2010; Houerou, 1981; Merot et al., 2008a; Mérot et al., 2011; Oliosio et al., 2013a).

A partir des mesures météorologiques réalisées depuis plusieurs décennies et des simulations climatiques réalisées à l'aide des modèles climatiques régionalisés, (Oliosio et al., 2013a) ont analysé les évolutions climatiques passées et futures jusqu'à l'horizon 2030. Ils ont montré que les températures ont augmenté faiblement pendant la première moitié du 20^{em} siècle, puis ont stagné jusqu'à 1980. Depuis l'augmentation se fait au rythme de 0.5-0,6 °C par décennie. Dans le futur, les hausses de température simulées pour le scénario A1B (Solomon et al., 2007) sont de l'ordre de 0,4 °C par décennie. Ces auteurs ont aussi indiqué que la pluviométrie a eu une augmentation sensible dans la première moitié du XXe siècle, suivi par une baisse sensible pouvant aller jusqu'à 3 mm par an à partir de 1960. Les tendances à la baisse de la pluviométrie concernent essentiellement l'été et l'hiver. Dans le futur, les tendances annuelles sont à une baisse légère d'environ 0,4 mm par an. Depuis 1980, une augmentation a été enregistrée sur l'évapotranspiration, de l'ordre de 17 mm par décennie. Ces augmentations pourraient se poursuivre et rester fortes dans le futur, de l'ordre de 20 mm par décennie. La combinaison de la baisse en pluviométrie avec la hausse de l'évapotranspiration amplifie le déficit climatique annuel en eau d'environ 45 mm par décennie depuis 1960. Cette tendance doit se poursuivre dans le futur avec une augmentation du déficit hydrique annuel d'environ 20 mm par décennie.

Les évolutions climatiques sur le bassin versant de la Durance (baisse des précipitations plus fortes que sur la Crau, augmentation des températures conduisant à une diminution du manteau neigeux et à sa fonte précoce, ...) auront un effet direct sur le débit de la Durance et pourront impacter les modes de gestion de la retenue de Serre-Ponçon. Si le débit de la Durance peut être considéré comme un indicateur de la disponibilité de l'eau de la Durance, on ne peut le traduire directement en quantité d'eau disponible pour l'irrigation. Celle-ci dépend également de la gestion de la retenue de Serre-Ponçon et d'une éventuelle modification des arbitrages entre les différents usages de l'eau de Serre-Ponçon (irrigation, tourisme, débits réservés pour les écosystèmes du lit de la rivière, production d'hydro-électricité, ...).

1.1.3.3 Évolution des pratiques d'irrigation

Grâce à l'intervention d'Adam de Craonne, en construisant des canaux d'irrigation afin d'amener l'eau de la Durance en Crau, la Crau « verte » irriguée est apparue. Ce système traditionnel d'irrigation, tout en générant des « externalités » positives qui commencent à être reconnues (recharge de l'aquifère, structuration du paysage de bocage, enrichissement des sols par apport de limons, possibilité d'insérer les réseaux de canaux dans une politique de gestion des eaux de pluie, ...) est cependant fortement consommateur d'eau.

La construction du barrage de Serre-Ponçon a amélioré la régularité des débits de la Durance et la régularité de la disponibilité en eau dans la Crau, ce qui est positif. Mais dans le même temps, il a entraîné une réduction des apports limoneux de 10 mm/an jusqu'à 3-4 mm/an, dans les zones irriguées à la Crau (Andrieux, 1981; Bessonnet, 2002; Martin, 2008).

La modernisation des irrigations gravitaires par submersion afin d'en améliorer l'efficacité en limitant les pertes et fuites venant des canaux et la percolation sous la zone racinaire, peut avoir un effet négatif sur la nappe. Son maintien est en effet totalement dépendant des apports provenant de ces pertes : les estimations classiques montrent que de 66 à 82 % de la recharge annuelle est due aux irrigations (Oliosio et al., 2013a). D'un autre côté, des marges de manœuvre possibles vis-à-vis du maintien de la recharge à un niveau acceptable peuvent être définies à partir d'une bonne connaissance et représentation (modélisation) des différents processus hydrologiques et hydrogéologiques présents sur la Crau. L'eau ainsi économisée peut permettre une extension vers des nouvelles surfaces irriguées, contribuant ainsi à pérenniser les paysages spécifiques de la Crau et la production agricole. Elle pourrait également être revendue à EDF pour être turbinée.

Par ailleurs, le développement agricole pendant les années 1980-1990, avec une construction accrue des serres et la forte implantation de nouveaux vergers, s'accompagne d'une augmentation du nombre de forages pour assurer l'alimentation en eau des irrigations par pompage depuis la nappe de la Crau.

1.1.3.4 Conséquences des changements globaux sur les ressources hydriques de la plaine de la Crau

Différentes conséquences sur l'évolution hydrique de la nappe de Crau peuvent être observées en fonction de l'évolution de l'occupation du sol (Tableau 1.8). Ces évolutions se traduisent par l'augmentation des prélèvements dans la nappe et une baisse de la recharge. La baisse de la recharge peut avoir un effet important sur l'abaissement de niveau piézométrique de la nappe, qui peut atteindre jusqu'à 10 m dans la partie nord-est de la nappe (BRGM 1996). L'impact sur le niveau piézométrique de l'augmentation des prélèvements n'a pas été quantifié.

Les baisses du niveau piézométrique peuvent se propager jusqu'à l'aval de la nappe en contact avec le milieu marin, ce qui peut créer une remontée de biseau salé et un risque accru de salinisation de l'aquifère.

Evolution de l'occupation du sol	Enjeux associés pour le stock d'eau souterraine
Augmentation des occupations non agricoles (urbanisation, infrastructures, industries)	Diminution des apports à l'aquifère - Imperméabilisation et ruissellement accru
Augmentation de l'arboriculture et du maraîchage au détriment des prairies	Pression accrue sur l'abandon du gravitaire et donc risque de rabattement de l'aquifère
Remplacement partiel des prairies par d'autres spéculations végétales (céréales par exemple)	Faible risque quantitatif si bonne adaptation à l'irrigation gravitaire

Tableau 1.8: L'occupation du sol et les enjeux associés dans la plaine de la Crau. Source (Martin, 2008).

Les polluants agricoles, comme les pesticides dont l'usage a augmenté avec les nouvelles cultures (serres et les vergers), peuvent s'infiltrer vers la nappe. La baisse du niveau piézométrique liée à l'augmentation de ces nouvelles cultures pourrait s'accompagner d'un risque accru de pollution pour la nappe de Crau, et d'une moindre dilution de cette éventuelle pollution (Beltrando, 2015b; Martin, 2008).

L'urbanisation, correspondant à l'extension des zones urbaines et des zones industrielles et commerciales, exerce là aussi une pression accrue sur la ressource en eau souterraine liée à l'augmentation des prélèvements (besoins industriels et domestiques), à une réduction de la

recharge naturelle par les pluies (imperméabilisation des sols) et à la disparition de la recharge par l'irrigation des prairies lorsque les sols imperméabilisés proviennent d'anciennes prairies.

Par ailleurs, du fait de la forte perméabilité des sols et de l'aquifère et de la forte présence d'infrastructures industrielles lourdes de transformation et transport des produits pétroliers, la nappe est particulièrement vulnérable à des pollutions d'origine industrielles telles que celle qui s'est produite en août 2009 au cœur de la réserve naturelle des Coussouls de Crau par rupture d'un oléoduc et le déversement de 5400 m³ de pétrole qui a pollué une surface de 5 ha (Beltrando, 2015b).

1.1.4 Travaux réalisés dans l'UMR EMMAH sur le système Crau et points de blocage

L'UMR EMMAH en relation avec différents partenaires a entrepris depuis plusieurs années un important travail sur la Crau. L'objectif originel se situait dans la continuation des travaux sur le fonctionnement de la nappe profonde de Camargue qui est en prolongement direct de la nappe de Crau (De Montety, 2008). Il s'agissait dans un premier temps d'analyser les relations entre les pratiques agricoles, en particulier l'irrigation et la recharge de la nappe et dans un second temps d'analyser comment les changements globaux pouvaient affecter ces relations. Le démarrage de ces travaux s'est situé dans une période de contexte tendu sur la disponibilité de l'eau de la Durance pour l'irrigation. Le début du XXI^{ème} siècle a été marqué par une succession d'années particulièrement sèches : de 2001 à 2008, cinq années ont reçu moins de 470 mm à Salon-de-Provence. Des tensions inhabituelles sont apparues sur la ressource en eau (par exemple en 2003, 2005 et 2007) : par exemple, à la fin de l'été 2007, le débit des canaux d'irrigation a été réduit ce qui ne permettait plus d'irriguer les prairies. L'État a dû intervenir pour allouer à l'irrigation dans la basse vallée de la Durance un déstockage de près de 40 hm³, en sus des 200 hm³ de la réserve agricole du barrage de Serre-Ponçon. Dans la région PACA, la problématique d'un usage plus rationnel de l'eau par l'agriculture, pour en préserver les autres usages, est de plus en plus mise en avant ces dernières années (SOGREAH, 2010). En Crau, elle nécessite d'évaluer comment des économies d'eau seraient possibles, tout en maintenant la production de foin et la recharge de la nappe à un niveau satisfaisant les usages de l'eau en aval (alimentation en eau potable, pompes agricoles, préservation des zones humides...).

Les travaux entrepris par EMMAH dans le cadre de projets successifs (HYDROCCAM, ASTUCE & TIC, SIRRIMED, SICMED-CRAU) ont permis de développer un simulateur

intégrant la modélisation des processus de la production de foin, la modélisation du bilan hydrique et la modélisation du fonctionnement de l'aquifère ; voir Figure 1-18, (Baillieux et al., 2015; Oliosio et al., 2013a). Ce simulateur, appelé 'simulateur Crau', a permis d'évaluer la production des prairies, parcelle par parcelle, et les différents termes du bilan hydrique de l'aquifère de Crau et en particulier la recharge liée à l'irrigation (terme très mal connu d'après la bibliographie). La cartographie des productions, des drainages et de la piézométrie de l'aquifère est présentée en Figure 1-19 et les termes du bilan hydrique sont présentés dans le Tableau 1.9.

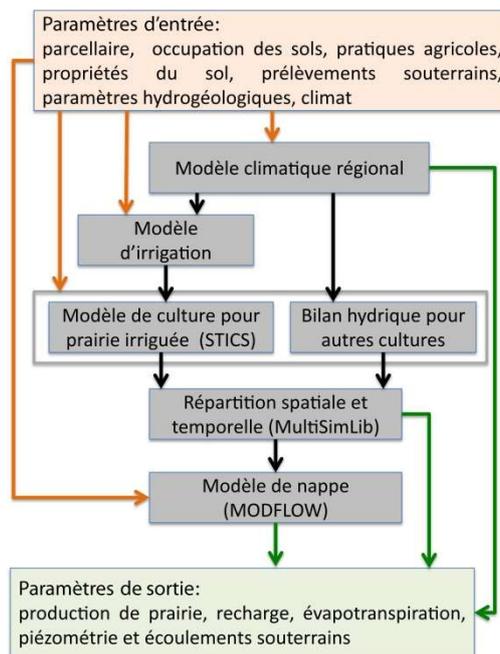


Figure 1-18 : Architecture de la chaîne de modélisation de l'agro-hydrosystème de la Crau (Baillieux et al., 2015).

Le simulateur a été utilisé pour simuler des évolutions futures du système Crau en fonction de scénarios réalistes de disponibilité hydrique, changement climatique et urbanisation (Tableau 1.9, Figure 1-19). Les résultats ont montré en particulier qu'une baisse de la disponibilité de l'eau de la Durance pour l'irrigation, comme le suggèrent les projections climatiques futures dans le bassin versant de la Durance, ne pénalisera pas forcément la productivité des prairies (de toute façon limitée réglementairement à 10 t/ha) en raison de compensations liées à l'augmentation des températures et un décalage des cycles phénologiques vers des périodes plus pluvieuses (la seule prise en compte des changements climatiques locaux montre une augmentation du rendement en foin). Par contre, une baisse de la disponibilité de l'eau de la Durance pour l'irrigation pourrait affecter fortement la recharge de la nappe. Ainsi une

réduction de 30 % des volumes utilisés pour l'irrigation entrainerait une baisse de 30 % de la recharge de la nappe. Cela correspond à une baisse de 35 %, donc plus que proportionnelle, du drainage sous les prairies.

Description	Scénario	Climat	Occupation du sol	Ressource en eau disponible pour irrigation (%)	Variation surface de prairies (%)	Pluie (hm ³)	Volume d'eau d'irrigation (hm ³)	Évapo-transpiration (hm ³)	Drai-nage sur la nappe de Crau (hm ³)	Drai-nage sous les prairies (hm ³)	Part des apports par irrigation drainée (%)	Contri-bution irrigation au drainage sur ensemble Crau (%)	Rendement* (t/ha)
Référence sur la période actuelle	<i>ref_a</i>	2003-2010	2009	100	0	294	297	321	277	217	75	78	8,15 (7,5-9,2)
Référence sur la période future	<i>ref_f</i>	A1B	2009	100	0	311	312	359	275	223	74	81	9,02 (8,1-10,0)
Impact du changement climatique			2025-2035										
Stagnation des surfaces de prairies													
Réduction des ressources en eau	<i>rte_</i>	A1B	2009	70	0	311	221	352	190	146	67	76	8,37 (7,5-9,5)
Impact du changement climatique			2025-2035										
Stagnation des surfaces de prairies													
Réduction des ressources en eau	<i>rte_sc0</i>	A1B	2030 (SC0)	70	-6	311	221	338	191	143	66	75	8,32 (7,4-9,4)
Impact du changement climatique			2025-2035										
Scénario tendanciel d'évolution de l'occupation du sol													
Réduction des ressources en eau	<i>rte_sc1</i>	A1B	2030 (SC1)	70	-8	311	220	325	191	140	65	73	8,36 (7,4-9,4)
Impact du changement climatique			2025-2035										
Scénario industriel d'évolution de l'occupation du sol													
Réduction des ressources en eau	<i>rte_sc2</i>	A1B	2030 (SC2)	70	-11	311	220	318	192	140	65	73	8,44 (7,5-9,5)
Impact du changement climatique			2025-2035										
Scénario tertiaire et résidentiel d'évolution de l'occupation du sol													

* Pour le rendement, les valeurs maximales et minimales sont présentées entre parenthèses.

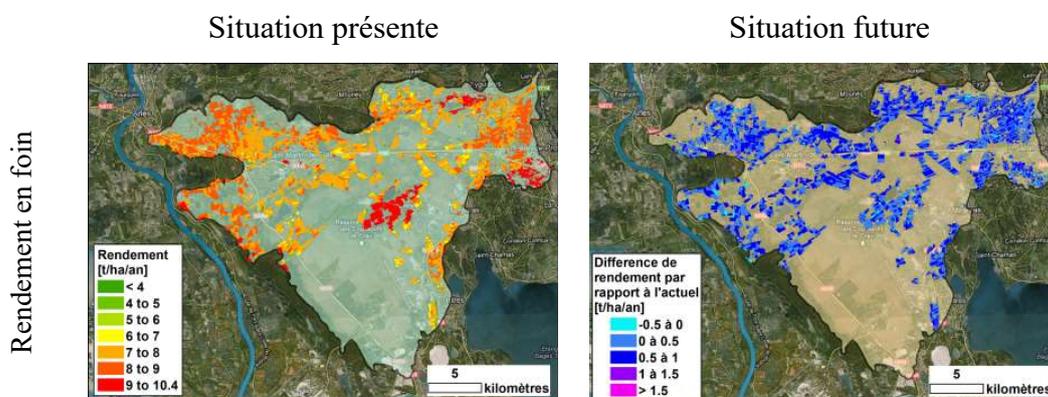
Tableau 1.9 : Description des scénarios prospectifs et des simulations des termes du bilan hydrologique de l'aquifère de la Crau et du rendement des prairies de foin de Crau. Les résultats correspondent à des moyennes annuelles sur les périodes considérées (Oliosio et al. 2013b).

Concernant les modifications de l'occupation des sols marquées par une baisse de la surface de prairies irriguées jusqu'à 11% (chiffre basé sur une modélisation de l'urbanisation simulée sur la base du fonctionnement socio-économique de la région de la Crau dans le cadre du programme Astuce et Tic,(De Mordant De Massiac et al., 2011)), elles se traduiraient mécaniquement par une diminution quasiment proportionnelle de la recharge. Une diminution de 11% de la surface irriguée résulterait en une diminution de 9% de la recharge, soit 24 hm³, un volume équivalent aux prélèvements pour l'alimentation en eau potable ou aux prélèvements pour l'agriculture.

Les simulations au moyen du Simulateur Crau ont confirmé que les prairies irriguées jouent un rôle majeur dans le renouvellement de la nappe et dans le cycle de l'eau en Crau. Pour l'ensemble de la Crau, le niveau moyen simulé pour la période actuelle atteint 277 hm³, dont

78 % proviennent de l'irrigation des prairies (soit 217 hm³, Tableau 1.9). Ces niveaux sont dans la fourchette haute des estimations de la bibliographie (Oliosio et al., 2013b). Dans les simulations, 75 % de l'eau apportée par irrigation gravitaire se retrouvent dans la nappe, ce qui se situe encore dans la fourchette haute des estimations réalisées localement : 40 – 80 % au Domaine du Merle selon la saison et la parcelle (Saos et al., 2006). Les simulations des niveaux de drainage et de la proportion d'eau provenant de l'irrigation des prairies dans la recharge sont globalement supérieurs aux estimations récentes réalisées par analyse de la composition chimique et isotopique de l'eau de la nappe. Cognard-Plancq et al. (2014) ont ainsi déterminé que la contribution de l'eau d'irrigation à la recharge de la nappe pouvait atteindre 80-85% sous les prairies. Plus récemment, (Seraphin et al., 2015) ont montré que sur l'ensemble de la Crau, la recharge de la nappe provenait à 69% (\pm 9%) de l'irrigation des prairies.

La validation des hypothèses de modélisation et l'évaluation du simulateur Crau ont permis de dégager deux aspects déterminants et mal connus du cycle de l'eau en Crau qui concernent l'évaluation des transferts d'eau vers la nappe et l'évaluation des apports par irrigation à la parcelle. Le suivi des transferts d'eau par traçage coloré dans les horizons superficiels du sol (Branquinho, 2011) et par la combinaison de mesures géophysiques et d'une modélisation des écoulements (Ma et al., 2011) ont montré la rapidité des transferts dans le sol vers la nappe, validant la forme de couplage surface/aquifère implémentée dans le simulateur. Par contre, la quantité d'eau d'irrigation drainée est beaucoup plus difficile à évaluer.



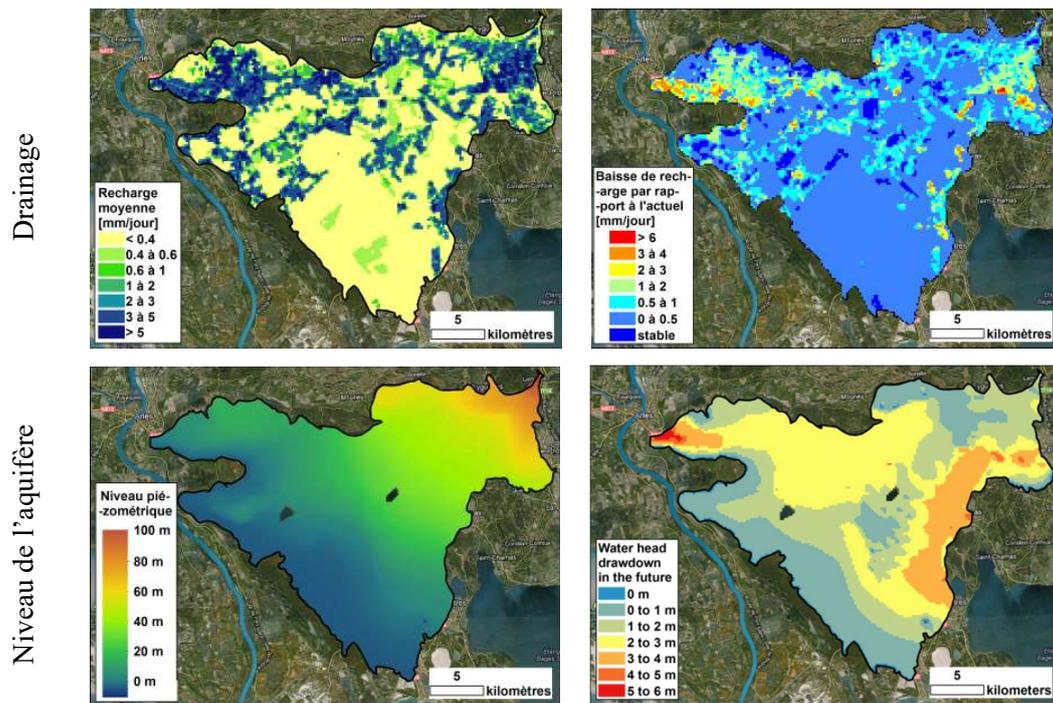


Figure 1-19. Colonne de gauche : cartographie du rendement, du drainage et du niveau de l'aquifère en situation actuelle ; Colonne de droite : différence par rapport à la situation présente d'une situation future qui considère les changements climatiques en 2030, une baisse de la disponibilité de l'eau de la Durance pour l'irrigation de 30% et une urbanisation ayant consommé près de 12 % des prairies irriguées (pour l'essentiel autour des grands centres urbains). D'après Olioso et al. (2013a).

Une des premières étapes des simulations réalisées par le simulateur Crau réside dans la détermination des doses d'irrigation appliquées à chaque parcelle de prairie (Figure 1-18). Deux types d'information sont requises pour modéliser l'irrigation ; la dose d'eau apportée à chaque irrigation et le calendrier de l'irrigation. Le calendrier d'irrigation doit tenir compte des contraintes suivantes : les dates de début et de fin de la saison d'irrigation, les fréquences des irrigations (le tour d'eau) et les conditions climatiques selon lesquelles les irrigants vont prendre la décision d'annuler une irrigation. La dose appliquée à chaque irrigation est calculée en fonction de la longueur de la parcelle avec une relation empirique qui a été déterminée à partir de mesures réalisées sur une exploitation par (Tourmetz, 2010), voir Figure 1-20. La validité de cette équation a été remise en question (Olioso et al., 2013b).

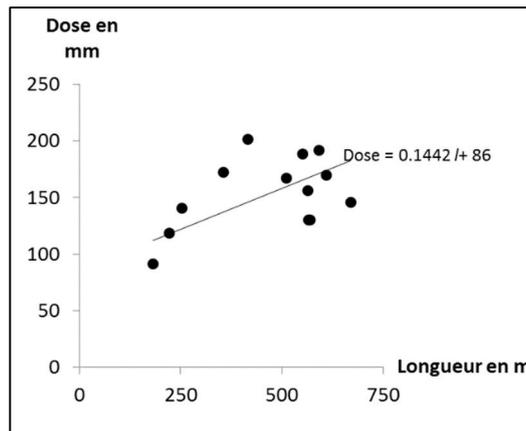


Figure 1-20 : Relation empirique calculant la dose d'irrigation apportée en fonction de la longueur de la parcelle (Tourmetz, 2010).

Afin d'améliorer la précision des prévisions du Simulateur Crau et réduire l'incertitude sur l'estimation de la part de la recharge de la nappe due à l'irrigation des prairies, une amélioration d'une part de la modélisation des calendriers d'irrigation sur toute la saison d'arrosage et d'autre part des doses d'irrigation apportées sur chaque parcelle en fonction de ses caractéristiques pédologiques et géométriques est nécessaire.

Le travail entrepris dans cette thèse a pour finalité de contribuer à améliorer l'estimation des doses apportées par irrigation. Dans ce cadre, les deux objectifs globaux ont été de :

- améliorer les connaissances du système d'irrigation en fournissant un modèle mécaniste à base physique ayant la capacité d'analyser les caractéristiques de l'irrigation gravitaire appliquée sur les prairies de Crau, d'évaluer les pratiques d'irrigation et de les optimiser,
- proposer des nouveaux modèles empiriques de dose, qui pourront être utilisés dans le simulateur Crau, en couplant des mesures expérimentales réalisées sur terrain avec des enquêtes menées dans des exploitations agricoles où l'irrigation gravitaire est utilisée principalement pour arroser les prairies.

1.2 Chapitre 2 : représentation et modélisation de l'infiltration gravitaire

1.2.1 Introduction du Chapitre 2

L'irrigation gravitaire dans le cas de l'irrigation à la planche (« border irrigation ») consiste à irriguer une parcelle par déversement à partir de sa bordure amont. La parcelle est alors progressivement submergée par l'eau ruisselée qui se propage suivant le sens de la pente. Les principaux facteurs qui influent sur le comportement de ce système d'irrigation traditionnelle peuvent se classer en 3 groupes :

- un premier groupe de facteurs concerne la conception du système d'irrigation : système d'amenée d'eau sous pression ou à surface libre, gestion amont ou gestion aval des infrastructures hydrauliques, le design de la parcelle et le mode de submersion....,
- un second groupe concerne la gestion du système d'irrigation : irrigation à la demande ou au tour d'eau, gestion de l'infrastructure hydraulique, contraintes de main d'œuvre ou d'organisation au sein de l'exploitation agricole, ...
- enfin, le troisième groupe concerne les phénomènes biophysiques qui contrôlent de façon indirecte les flux d'eau au sein de la parcelle : processus de ruissellement, processus d'infiltration, ...(Gillies et Smith, 2015; Strelkoff et Clemmens, 2007, Clemmens, 2009).

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur le troisième groupe de facteurs. La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation des processus hydrauliques à la surface du sol. La seconde partie concerne les processus d'infiltration. Je présente dans la troisième partie les différents modèles opérationnels existant dans la littérature et qui permettent à la fois de simuler une irrigation gravitaire, de l'optimiser et de réaliser des bilans à l'échelle de la parcelle. La dernière partie est consacrée à l'utilisation de ces modèles en inversion afin d'estimer les paramètres macroscopiques effectifs à l'échelle de la parcelle agricole.

1.2.2 Équations macroscopiques utilisées pour décrire l'irrigation par submersion

1.2.2.1 *Le modèle des équations de Barré de St Venant et ses différentes approximations*

Tous les modèles mathématiques qui décrivent la circulation de l'eau sur la surface de la parcelle et dans le sol incluent une ou les deux équations de Saint-Venant gouvernant le flux à surface libre. Celles-ci décrivent la conservation de la masse et la conservation de la quantité

de mouvement de l'eau sur la surface de la parcelle (Bader et al., 2010; Benham et al., 2000; Ebrahimian et al., 2010, 2011; Gillies et Smith, 2015; Mishra et al., 2003; Moravejalahkami et al., 2009; Moussa et Bocquillon, 1996; Pantelakis et al., 2011; Strelkoff et Clemmens, 1994). Ces modèles sont généralement unidimensionnels dans la direction de propagation du flux de ruissellement. Ils ne sont valables que lorsque les hypothèses des équations de Saint Venant sont respectées (Ancey, 2010; Pernès, 2004) :

- l'eau est considérée comme un fluide incompressible et sa masse volumique est constante ; l'effet des transports solides en suspension est négligeable ;
- le lit de submersion doit être fixe ; il n'y a ni érosion ni dépôt ;
- l'écoulement est unidimensionnel : ceci implique que la vitesse est uniforme dans la section mouillée et que la pente transversale de la surface libre est nulle ;
- les variations dans la section d'écoulement ne doivent pas être significatives sur des courtes distances ; de même, les hauteurs d'écoulement varient doucement d'un point à l'autre de l'écoulement ;
- la courbure des lignes de courant est faible ; ceci implique que la répartition de pression sur la verticale est hydrostatique ;
- les lois de frottement en régime non permanents peuvent s'écrire de la même façon qu'en régime permanent ;
- la pente longitudinale de la parcelle est faible ;
- le débit et la hauteur d'eau sont des grandeurs continues et dérivables du temps et de l'espace : ces équations ne décrivent pas des phénomènes discontinus tels que le ressaut hydraulique.

L'équation de la conservation de masse peut exprimer comme:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = -f \quad (1)$$

Et l'équation de conservation de la quantité de mouvement est:

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2g} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(1 - \frac{Q^2 l}{A^3 g}\right) \frac{\partial H}{\partial x} - I + S_f = 0 \quad (2)$$

Où:

Q : le débit ruisselé (m^3/s),

x : est la direction de l'écoulement (m), généralement dans le sens de la longueur de la parcelle,

A : section de l'écoulement (m²),

l : largeur de ruissèlement (m),

H : la hauteur de l'eau à la surface du sol (m),

t : la durée de l'irrigation (s),

f : le débit d'infiltration dans le sol par unité de longueur (m³/m²/s),

g : accélération de la gravité (m/s²),

I : la pente de la parcelle (m/m),

S_f : la pente de la ligne d'énergie due au frottement (m/m).

On peut également introduire la vitesse moyenne de l'écoulement $U = Q/A$.

L'équation (2) peut être simplifiée en fonction des phénomènes physiques dominants rencontrés. Et effet, chaque terme de gauche de l'équation (2) peut s'interpréter comme une pente due à un phénomène particulier (Fiedler et Ramirez, 2000) :

- le terme $\frac{1}{Ag} \times \frac{\partial Q}{\partial t}$ correspond à la pente due à l'accélération de l'écoulement (écoulement non permanent)
- le terme $\frac{2Q}{A^2g} \times \frac{\partial Q}{\partial x}$ correspond à la pente due à la variation spatiale de l'écoulement (écoulement non uniforme).

Ces deux termes correspondent à des termes d'accélération (temporelle et spatiale respectivement) ou d'inertie et sont généralement négligeables par rapport aux termes suivants (Moussa et Bocquillon, 1996).

- Le terme $\partial H/\partial x - I$ correspond à la pente de la surface libre de l'écoulement
- Enfin le terme S_f correspond à la pente de la ligne d'énergie en écoulement uniforme due au frottement

En fonction des phénomènes prépondérants, les modèles décrivant l'irrigation par submersion se classent en 4 catégories (Bader et al., 2010; Benham et al., 2000; Ebrahimian et al., 2010, 2011; Gillies et Smith, 2015; Saucedo et al., 2005; Strelkoff et al., 1996; Strelkoff et Clemmens, 1994; Tayfur et al., 1993; Valipour, 2012) :

1. Les modèles complets ou « Full hydrodynamic models », qui utilisent la forme la plus générale des équations de Saint-Venant, sont les plus précis, mais aussi les plus complexes. Ils produisent des simulations plus précises pour des grandes gammes des

conditions d'irrigation par rapport aux autres catégories. Grâce à leur précision, ils peuvent être utilisés pour calibrer et évaluer des modèles plus simples.

2. Les modèles sans inertie ou modèles d'onde diffusive sont basés sur le fait que les vitesses d'écoulement dans la section mouillée et les termes d'inertie présentés dans l'équation (2) sont très petits, et que des changements temporel et spatial de vitesse sont pratiquement négligeables et l'équation (2) devient alors :

$$\frac{\partial H}{\partial x} = I - S_f \quad (3)$$

Les solutions numériques pour ces modèles sont moins compliquées et nécessitent moins de temps de calcul pour simuler une irrigation en comparaison des modèles complets précédents.

3. Les modèles d'onde cinématique supposent que la variation spatiale de la hauteur d'eau, qui correspond au gradient $\frac{\partial H}{\partial x}$ est faible par rapport à la pente longitudinale de la parcelle : la pente de ligne d'énergie due au frottement est égale à la pente de la parcelle et l'équation (2) s'écrit $I = S_f$.
4. Les modèles de bilan « equilibrium volume » sont basés sur la seule équation de conservation de la masse. Ce sont des modèles plus conceptuels qui supposent que le volume d'eau appliqué à un moment donné est égal au volume d'eau stocké sur la surface de la parcelle plus le volume de l'eau infiltrée dans le sol. Ils négligent totalement les termes d'inertie dans l'équation de Saint Venant.

Pantelakis et al. (2011) ont proposé un paramètre adimensionnel appelé nombre d'onde cinématique K_{OC} qui peut être utilisé afin d'évaluer l'exactitude de l'hypothèse d'onde cinématique dans la modélisation d'écoulement sur une parcelle irriguée. Le nombre d'onde cinématique K_{OC} est donné par l'équation suivante :

$$K_{OC} = \frac{I \times L}{h_0 \times Fr_0^2} \quad (4)$$

où I est la pente de la parcelle, L est la longueur de parcelle, h_0 est la profondeur d'écoulement à l'abscisse L et Fr_0 est le nombre de Froude : $Fr_0 = \frac{U}{\sqrt{g * h_0}}$, avec U la vitesse moyenne de l'écoulement.

Le paramètre K_{OC} reflète les effets de la longueur et de la pente de la parcelle, ainsi que le débit du flux de l'écoulement et sa vitesse d'avancement (Pantelakis et al., 2011; Singh, 1996). L'approximation de l'onde cinématique serait applicable pour $K_{OC} > 20$ (Morris et Woolhiser, 1980; Pantelakis et al., 2011; Vieira, 1983).

Pantelakis et el al. (2011) ont montré que le modèle cinématique peut être utilisé à la place du modèle complet de l'équation de Saint Venant (Eq 2) dans les cas où $K_{OC} * Fr_0^2 \geq 5$, ce qui est favorisé par une forte pente et/ou une augmentation de la longueur de la parcelle.

1.2.2.2 *Les différentes lois de frottement : Chézy, Darcy-Weisbach, Manning-Strickler*

Plusieurs coefficients de rugosité hydraulique ont été proposés pour caractériser la résistance d'une parcelle à l'écoulement comme le coefficient de rugosité de Manning (n , s m^{-1/3}), le coefficient de Strickler (k , m^{1/3} s⁻¹) le facteur de résistance Chezy (C , m^{1/2} s⁻¹), et le coefficient de frottement de Darcy-Weisbach (f_D , paramètre adimensionnel) (Hessel et al., 2003; Kim et al., 2012). Les expressions de Manning et de Strickler sont identiques, le coefficient de frottement de l'un étant l'inverse du coefficient de frottement de l'autre.

Dans le cas de l'irrigation gravitaire, la résistance contre le débit ruisselé causée par la surface du sol et la présence de végétation peut s'exprimer par la pente de frottement S_f qui dépend de la géométrie, de la surface de la section de l'écoulement (section mouillée) et du débit ruisselé. Cette pente de frottement S_f peut exprimer à partir de l'équation de Chézy comme suivant ;

$$S_f = \frac{Q|Q|}{A^2 C^2 R} \quad (5)$$

où, A est la surface de la section de l'écoulement, Q le débit ruisselé, R le rayon hydraulique (Strelkoff et Clemmens, 2007), et C le coefficient de Chézy. Faire intervenir la grandeur $Q|Q|$ au lieu de Q^2 permet de générer des pentes de frottement dans le sens inverse de l'écoulement (donc des pentes négatives en considérant par convention que le sens positif est le sens de l'amont de la parcelle vers l'aval de la parcelle).

Maheshwari et McMahon (1993) et Robertson et al. (2004) ont montré que l'équation de Manning ou de Strickler était adéquate pour décrire les effets de frottement de surface et donc pour bien modéliser l'avancement de l'eau dans l'irrigation de surface. Cette équation appelée équation de Manning-Strickler peut s'écrire de la façon suivante pour une parcelle agricole de largeur l et irriguée dans le sens longitudinal :

$$Q = k \times l \times S_f^{1/2} \times h^{5/3} \quad (6)$$

où Q est le débit, l est la largeur de la parcelle, h est la hauteur de ruissèlement, S_f est la pente de frottement et $k = 1/n$ est le paramètre empirique du rugosité.

Le Tableau 1.10 donne les 3 expressions empiriques reliant la pente de frottement S_f à la vitesse moyenne de l'écoulement U (supposée positive) dans le cas d'une parcelle irriguée par submersion de façon homogène transversalement, présentant une largeur très supérieure à la hauteur de la lame d'eau. L'équation de Manning est la plus utilisée dans la plupart des modèles hydrauliques

	Chézy	Manning-Strickler	Darcy-Weisbach
Loi d'écoulement	$U = C \cdot \sqrt{S_f} \cdot h^{1/2}$	$U = k \cdot \sqrt{S_f} \cdot h^{2/3}$	$U = \frac{\sqrt{8 \cdot g}}{\sqrt{f_D}} \cdot \sqrt{S_f} \cdot h^{1/2}$
Coefficient de frottement	$C \text{ (m}^{1/2} \text{ s}^{-1}\text{)}$	Strickler : $k \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$ Manning : $n \text{ (s m}^{-1/3}\text{)}$ $k = 1/n$	$f_D \text{ (-)}$

Tableau 1.10: Les différentes lois empiriques de frottement pouvant être utilisées pour l'irrigation par submersion.

1.2.2.3 La signification du coefficient de friction hydraulique dans les conditions de l'irrigation par submersion

La résistance hydraulique est l'un des facteurs les plus importants à prendre en compte pour décrire les performances d'une irrigation de surface. Cette résistance hydraulique peut s'exprimer par le coefficient de frottement qui inclut la friction hydraulique due à la rugosité de la surface du sol et celle induite par le couvert végétal (Clemmens et al., 1998; García Díaz, 2005; Li et Zhang, 2001; Wilson, 2007).

La modélisation de la propagation du ruissèlement ainsi que le calcul du volume d'eau instantané stocké à la surface du sol dans les systèmes d'irrigation traditionnels dépendent de la connaissance des paramètres hydrauliques appropriés (Clemmens, 2009; Kim et al., 2012). La mauvaise estimation du coefficient de rugosité se traduit par une mauvaise estimation de ces différents processus (Clemmens, 2009; Clemmens et al., 1998; Robertson et al., 2004).

La détermination a priori de la valeur du coefficient de frottement hydraulique dans les conditions d'une irrigation par submersion est délicate. On trouve dans la littérature de nombreux tableaux permettant de donner une valeur à priori au coefficient de frottement dans

le cas d'un écoulement dit « submergeant », c'est à dire un écoulement dont l'épaisseur de la lame d'eau est très supérieure aux hauteurs caractéristiques des rugosités qui induisent le frottement. C'est le cas pour des écoulements dans des canalisations, dans des canaux artificiels où dans des rivières et fleuves naturels (Degoutte, n.d.; Ebrahimian et al., 2010; Engman, 1986; Valiantzas et al., 2001).

Pour des écoulements non submergeant, peu de données existent. Ainsi, (Gilley et al., 1991) a paramétré la valeur du coefficient de frottement de Darcy-Weisbach pour des écoulements à la surface de sol présentant un mulch végétal en surface. (García Díaz, 2005) a analysé l'évolution de la friction hydraulique; représenté par le coefficient de Manning, sur des ruissellements avec faible hauteur traversant différents types de couverts végétaux (prairies, buissons et forêts du pin) et pour différentes pentes. Wilson, (2007) et Wu et al., (1999) ont étudié les relations entre le coefficient de Manning et la hauteur de ruissellement, la vitesse d'écoulement et les végétations dans différentes conditions (hauteur, densité, type...) à partir des données réelles et simulées. Mailhol et Merot (2008) ont établi un modèle qui prédit le coefficient de Manning en fonction du LAI observé dans une parcelle implantée par des prairies.

De façon globale, différentes variables macroscopiques affectent la valeur de ce paramètre qui de plus peut évoluer de façon temporelle et spatiale en fonction de différents facteurs liés aux :

1. conditions de l'écoulement : l'épaisseur de la lame d'eau propagée, le débit ruisselé, la vitesse d'avancement du flux et la pente de la surface irriguée ;
2. conditions de couverture végétale : la hauteur de la végétation traversée, le LAI, le port et la rigidité des feuilles, les propriétés de structure de la végétation et le nombre de jours après le fauchage (Austin et al., 1996; Bader et al., 2010; Clemmens, 2009; Clemmens et al., 1998; García Díaz, 2005; Kim et al., 2012; Robertson et al., 2004; Turner et al., 1978; Turner et Chanmeesri, 1984; Wilson, 2007).

1.2.3 Les différentes lois d'infiltration

Pour représenter l'infiltration, de nombreux modèles peuvent être utilisés. On peut les classer en trois catégories selon les paramètres de base de chacun (Igboekwe et Adindu, 2014 ;

Mishra et al., 2003). Dans chacune des équations suivantes, le symbole f correspond au débit instantané d'infiltration par unité de surface de la parcelle ($m^3 m^{-2} s^{-1}$) et le symbole F correspond à la quantité d'eau infiltrée par unité de surface de la parcelle depuis le début de l'irrigation ($m^3 m^{-2}$)

- A. Modèles à **base physique** : ils s'appuient sur la conservation de la masse et la loi de Darcy. Les paramètres de ces modèles ont un sens physique et sont reliés à la conductivité hydraulique du sol, sa teneur en eau, sa capacité de rétention hydrique. Des exemples de ces modèles sont donnés par Mein et Larson (1973), Philip (1969), Green et Ampt (1911), Smith (1972) et Smith et Parlange (1978), Richards (1931).
- B. Modèles **semi-empiriques** : ils utilisent des formes de l'équation de la continuité couplée avec des simples hypothèses sur la loi d'infiltration qui ne repose plus sur la loi de Darcy. Ces modèles calculent le flux d'infiltration et l'infiltration cumulée. On trouve dans cette catégorie les modèles de Horton (1939), Holtan (1961), Singh et Yu (1990) ou encore de Grigorjev et Iritz (1991).
- C. Modèles **empiriques** : ils sont basés sur les données dérivées depuis des expérimentations sur le terrain ou en laboratoire tel que le modèle de Kostiakov (1932), Huggins et Monke (1966), Kostiakov modifié (Smith, 1972) et les modèles de Collis-George (1977).

Les différents équations d'infiltration :

Les principales équations décrivant l'infiltration sont décrites ci-dessous.

1. Le modèle de **Kostiakov** (1932) et ses variantes,

La forme générale de cette équation était proposée par (Kostiakov, 1932) :

$$F = k_i t^a \quad \text{et} \quad f = K_i t^\alpha \quad (7)$$

où t est le temps (s), a ($0 < a < 1$) et k_i ($m s^{-a}$) sont des constantes dont les valeurs dépendent du couvert végétal, de l'intensité des flux d'eau, des caractéristiques du sol ainsi que de son état d'humidité initial et des conditions de surface (Igboekwe et Adindu, 2014), α et K_i sont des constantes où $K_i = a * k_i$ et $\alpha = a - 1$, (Mishra et al., 2003).

2. Le modèle de **Kostiakov modifiée** (Smith, 1972),

Dans cette nouvelle équation, un nouveau terme noté f_{ct} représentant l'infiltration préférentielle dans des macro-pores est ajouté. L'équation devient :

$$F = k_i t^a + f_c t \quad (8)$$

$$f = K_i t^a + f_c \quad (9)$$

où t est le temps (s), f_c (m s^{-1}) est le flux d'infiltration final qui est un coefficient constant.

3. Le modèle de **SCS** (Soil Conservation Service, US Département de l'Agriculture 1984):

Cette équation est utilisée pour calculer l'infiltration pour différents groupes de sol qui sont définis et paramétrés par le USDA, elle s'écrit :

$$F = [k_i t^a + c_i] \frac{P}{l} \quad (10)$$

où k_i et a sont des coefficients constants spécifiés pour chaque groupe de sol, c_i est égal à 7 mm pour tous les groupes, l est la largeur de la lame d'eau à la surface du sol, et P est le périmètre mouillé. P peut se calculer comme suit:

$$P = 0.265 \left[\frac{60 Q_i n}{1000 \sqrt{I}} \right]^{0.425} + 0.227 \quad (11)$$

où n est le coefficient de Manning ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$), I est la pente ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$), et Q_i est le débit d'injection ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

4. Le modèle de **Philip**, (1969) peut s'écrire de la façon suivante :

$$F = S t^{-0.5} + A_i t \quad (12)$$

où S est la sorptivité du sol ($\text{m s}^{-0.5}$), un terme lié aux forces capillaires, A_i (m s^{-1}) est un coefficient lié à la conductivité hydraulique à saturation. Ce sont des coefficients constants (Clemmens et Bautista, 2009). Cette équation est validée dans des conditions de sol homogène et pour une humidité initiale qui doit être constante avec la profondeur (Mishra et al., 2003; Peschke et Kutílek, 1982).

5. Modèles de **Clemmens**, (1981) :

Ce sont des modèles qui correspondent à des variantes de l'équation de Kostiakov. Dans cette équation on prend en compte le temps τ_b jusqu'à l'obtention d'un flux d'infiltration stabilisé égal à b (m s^{-1}) équivalant à la conductivité hydraulique à saturation K_s . La description du flux d'infiltration se compose donc de deux phases, la 1^{ère} inclut la fonction exponentielle comme dans les autres équations au-dessus, et la 2^{ème} partie représente la phase d'infiltration stable pour $t > \tau_b$;

$$F = k_i t^a + c \quad \text{pour } t \leq \tau_b \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 f &= K_i t^\alpha + c \\
 F &= k_i t^\alpha + c + b(t - \tau_b) \quad \text{pour } t > \tau_b \\
 f &= b \\
 \tau_b &= \left(\frac{ak}{b}\right)^{1/1-a}
 \end{aligned}$$

c est une constante en m.

6. Le modèle **Time-Rated intake** family de (Merriam et Clemmens, 1985) est également une variante du modèle de Kostiakov. Il s'écrit :

$$F = k_i t^a + c \quad (14)$$

En calculant le temps nécessaire en heures pour infiltrer 100 mm l'exposant a peut être estimé depuis la relation empirique suivant (Clemmens et Bautista, 2009) :

$$a = 0.675 - 0.2125 \log_{10}(\tau_{100}) \quad (15)$$

7. Modèle de **Green et Ampt** (Green et Ampt, 1911):

Green et Ampt (2011) ont proposé un modèle d'infiltration dans un sol homogène. Ce modèle considère une infiltration « en piston » : le front d'infiltration se propage en profondeur sans déformation. Ce modèle a une base physique, contrairement aux modèles empiriques de Kostiakov ou de ses dérivés vus dans les paragraphes précédents. Plusieurs auteurs (voir par exemple (Kutilek and Nielsen, 1994)) ont montré que une infiltration « en piston » correspond à un sol ayant une courbe de conductivité hydraulique de type Dirac: la valeur de la conductivité hydraulique est nulle sauf à la saturation.

L'équation de Green–Ampt se présente sous la forme suivante :

$$f_{GA} = K_s \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) P_{ini}}{F_{GA}} \right] \quad (16)$$

où f_{GA} est le flux d'infiltration (m s^{-1}), F_{GA} l'infiltration cumulée (m), K_s est la conductivité hydraulique à saturation (m s^{-1}), P_{ini} est la succion capillaire au niveau du front d'infiltration (m), θ_i et θ_s sont la teneur en eau initiale et à saturation ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Ce modèle est adapté aux cas où l'infiltration est rapide. Il se caractérise par sa simplicité et sa relative précision (Clemmens et Bautista, 2009).

8. Modèle d'**Horton**, (1939) la forme générale de cette équation est :

$$f = H_f \Delta \theta \left(1 - e^{(-\aleph K_s (H_f \Delta \theta)^{-1} \tau)} \right) + K_s t \quad (17)$$

les paramètres présentés dans ce modèle sont identifiés dans la forme prédictive de (Mailhol, 2003) comme suit : \aleph paramètre empirique gouvernant l'effet des macropores au début de l'infiltration, H_f paramètre lié au réseau capillaire et $\Delta \theta$ est la variation de la teneur en eau initiale et à saturation. L'utilisation de cette équation est limitée aux infiltrations de courte durée.

Du fait de sa simplicité, les modèles de Kostiakov et de Kostiakov modifié sont souvent utilisés dans les modèles d'irrigation par submersion. Cependant ces sont des modèles empiriques dont les paramètres ne peuvent pas être mesurés mais doivent être ajustés. C'est également le cas du modèle de Horton. De plus le modèle de Kostiakov original considère que aux temps longs, le flux d'infiltration tend vers zéro, ce qui ne correspond pas à la réalité. Ainsi, les performances des variantes de ce modèle sont généralement supérieures aux performances du modèle original (Benham et al., 2000).

Grace à sa simplicité et sa versatilité, le modèle de Green et Ampt est également largement répandu et intégré dans les modèles d'irrigation par submersion (Fiedler et Ramirez, 2000; Pantelakis et al., 2011; Taskinen et Bruen, 2007; Tayfur et al., 1993). De plus, les paramètres ont un sens physique. Sa formulation fait intervenir dans la même équation l'infiltration instantanée et l'infiltration cumulée, ce qui le rend moins simple d'utilisation.

1.2.4 Présentation de différents modèles opérationnels

Plusieurs modèles opérationnels qui permettent de décrire et de piloter l'irrigation gravitaire par submersion existent dans la littérature. Ils sont décrits dans cette section. On décrit pour chaque modèle ses hypothèses, les équations utilisées, et les variables de sortie générées par le modèle.

1.2.4.1 *WinSRFR modèle (Bautista et al., 2009b)*

C'est un logiciel d'analyse des systèmes d'irrigation traditionnelle (raie, bassin et gravitaire). Il se base sur différentes hypothèses pour le ruissellement : modèle de ruissellement de type onde diffusante ou « zéro-inertie », « onde cinématique », et modèle « equilibrium volume ». Il peut être utilisé pour simuler ou analyser une irrigation ainsi que dans une optique de conception et de dimensionnement de réseaux d'irrigation. Ces fonctions visent à analyser et à améliorer la performance hydraulique d'un système d'irrigation (Bautista et al., 2009b). La fonction d'analyse est la plus importante car elle permet de s'assurer que les données d'entrées nécessaires pour démarrer les fonctions suivantes (les paramètres d'infiltration estimés et les données d'évaluation du système étudié) sont présentes. Elle sert à évaluer la performance d'un système d'irrigation en se basant sur des données expérimentales qui aident à estimer les paramètres de l'infiltration et de la friction hydraulique pour la parcelle. Le but de la deuxième fonction (l'analyse d'opération) est d'examiner des scénarios opérationnels en fixant les paramètres géométriques de la parcelle et les paramètres du sol. Dans cette fonction WinSRFR peut analyser la performance de différents termes d'un scénario d'irrigation proposé tel que l'homogénéité de la distribution de l'eau et l'évolution de ruissellement et du drainage. La troisième fonction vise à chercher la performance maximale d'un scénario d'irrigation en variant les dimensions de la parcelle (par des recherches de compromis entre des combinaisons de longueur-débit disponible-largeur- pente). La validation d'un paramètre estimé dans la première fonction ou la performance d'un scénario testé dans la 2ème et la 3ème fonction se fait à l'aide de la fonction de simulation (la quatrième fonction) en réalisant une analyse de sensibilité pour étudier l'impact de sa variation sur les variables de sortie recherchées.

Cinq formules d'infiltration sont utilisées dans le logiciel WinSRFR : le modèle de Kostiaikov , le modèle de Kostiaikov modifiée , l'équation Le modèle de SCS , le modèle Time-Rated intake (Clemmens, 1981).

Les données nécessaires pour démarrer une simulation sont le type de système d'irrigation (irrigation à la raie, irrigation submersion ou bassin), la géométrie du système choisi incluant la longueur, la largeur et la pente, les propriétés du sol telles que les paramètres d'infiltration, l'état de la végétation (et donc le coefficient de Manning). De plus le modèle a besoin des informations sur le débit d'eau injecté au cours de l'irrigation (Bautista et al., 2012).

Différents jeux de variables peuvent être obtenus en sortie du modèle ; l'hydrogramme des différents flux (injecté, ruisselé et en sortie de la parcelle), le profil d'infiltration (quantité d'eau stockée, drainage, infiltration cumulée), les courbes d'avancement et de récession de la lame d'eau en fonction du temps, etc ... (Bautista et al., 2012).

1.2.4.2 *Le modèle SISCO : Surface Irrigation Simulation, Calibration and Optimisation (Gillies and Smith, 2015)*

En se basant sur la formulation hydrodynamique complète des équations de Saint Venant, le modèle SISCO (Gillies et Smith, 2015) simule les processus d'une irrigation de surface (raie et submersion) en appliquant l'équation de Kostiakov modifiée pour estimer l'infiltration.

Pour démarrer un calcul avec SISCO, les informations suivantes sont nécessaires : la pente, les dimensions de la parcelle ou de la raie (longueur, largeur), les paramètres de l'infiltration, le débit d'injection et le coefficient de Manning pour la rugosité hydraulique. Les utilisateurs peuvent prendre en compte les variations spatiales des paramètres d'infiltration et de la rugosité en insérant des jeux de valeurs correspondant au cas réel. Les variations temporelles pour le débit injecté peuvent également être introduites.

1.2.4.3 *SIRMOD III, (Walker, 2003)*

Ce modèle d'irrigation de surface (raie, bassin et submersion) a été développé sur la base de l'équation de Saint Venant avec différentes approximations (hydrodynamique complète, sans inertie et onde cinématique) (Ebrahimian et al., 2011) pour simuler les processus hydrauliques pendant une irrigation. L'infiltration est simulée avec l'équation de Kostiakov modifiée. Comme pour les précédents modèles, les entrées incluent les caractéristiques d'infiltrations et de résistance hydraulique, les géométries (longueur, largeur et pente), le débit d'entrée appliqué et la durée de l'irrigation.

Les variables pouvant être simulées avec SIRMOD sont les courbes d'avancement et de récession du ruissellement à la surface du sol, la distribution du profil d'infiltration dans le sol, le volume d'équilibre, l'hydrogramme de ruissellement et des indicateurs de l'efficacité et de l'uniformité de la distribution d'eau.

1.2.4.4 *SIP-Merle (Merot, 2007)*

SIP-Merle décrit l'irrigation gravitaire en couplant l'équation de Saint Venant sous la forme de l'onde cinématique avec l'équation de Horton pour l'infiltration dans le sol.

Plusieurs variables sont simulées avec SIP-Merle comme la durée efficace d'irrigation, la quantité d'eau apportée, la quantité d'eau infiltrée et sa répartition de l'amont à l'aval de la parcelle, les performances hydrauliques de l'arrosage, l'efficacité d'application, le rendement hydraulique, le coefficient d'uniformité, le pourcentage de pertes en colatures et en percolation profonde.

Les données d'entrée nécessaires sont des valeurs moyennes sur l'ensemble de la parcelle et pendant toute la durée d'irrigation : débit d'entrée, largeur, longueur et pente de la parcelle, déficit en eau du sol, frottement hydraulique sous la forme du coefficient de Strickler k (le coefficient de Strickler est l'inverse du coefficient de Manning).

1.2.4.5 *Calhy ; modèle de ruissellement (Bader et al., 2010)*

Ce modèle d'irrigation gravitaire monodimensionnel simule le ruissellement et l'infiltration des eaux d'irrigation (irrigation gravitaire) dans un sol multicouche. Pour simuler la propagation du ruissellement à la surface de la parcelle, il utilise les équations de Saint Venant avec l'approximation de l'onde cinématique ou diffusante. L'infiltration est décrite par le modèle de Green & Ampt. L'équation de Manning-Strickler est utilisée pour la relation entre la hauteur d'eau et le débit.

Le modèle Calhy permet de modéliser à chaque pas de temps et de distance l'évolution de la hauteur de la lame d'eau, le débit ruisselé, le flux d'infiltration et l'infiltration cumulée. Il établit aussi le bilan hydrique pour chaque simulation à l'échelle de la parcelle.

Par défaut, le modèle Calhy suppose que l'ensemble des paramètres fournis est homogène et uniforme sur l'ensemble de la parcelle. Ces simplifications justifient le faible nombre des paramètres d'entrées requis par Calhy. Cependant, des paramètres variables le long de la parcelle peuvent être introduits en modifiant le code informatique.

La majorité des modèles d'irrigation, incluant ceux présentés au-dessus, ne prennent pas en compte le piégeage de l'eau d'irrigation dans les microtopographies du sol. Cette eau piégée peut modifier la dynamique d'infiltration. Elle peut donc influencer sur l'estimation des volumes d'eau à la surface de parcelle ou avoir un impact sur l'estimation du coefficient de frottement avec ces modèles (Morris et al., 2015).

Le modèle Calhy prend en compte cette détention superficielle en introduisant un paramètre, noté H_0 (m), qui représente la quantité d'eau stockée à la surface avant que le ruissellement puisse se propager plus en aval de la parcelle.

1.2.5 Utilisation des modèles opérationnels en mode inverse : estimation des propriétés des sols et des doses appliquées

Les paramètres intervenant dans les équations précédentes (paramètres liés au sol, coefficient de frottement hydraulique) sont difficiles à mesurer ou à estimer à l'échelle de la parcelle. Certains auteurs ont essayé de déduire ces paramètres d'observations portant sur la dynamique de l'irrigation par submersion (Cahoon, 1998; Clemmens, 2009b; Clemmens et al., 1998; Ebrahimian et al., 2010; Gillies et al., 2006). L'estimation des paramètres de l'infiltration peut s'effectuer à l'aide des modèles précédents par ajustement et méthode inverse. D'après plusieurs auteurs (Bautista et al., 2009b; Ebrahimian, 2014; Ebrahimian et al., 2010; Gillies and Smith, 2005; Mailapalli et al., 2008; Strelkoff et al., 2009; Weibo et al., 2012), la nature et le nombre de paramètres que l'on peut estimer varient selon:

1. les données disponibles. Ces données peuvent être les courbes d'avancement et de récession de l'eau de ruissellement, l'infiltration cumulée, etc...
2. les équations d'infiltration de base incluses dans les modèles : équation de Kostiaikov, de Philip, de Green et Ampt...
3. le choix du modèle de ruissellement : hydrodynamique complète, sans inertie, onde cinématique, etc...

Différentes méthodes ont été proposées pour ces estimations :

- certaines méthodes se basent sur un seul jeu d'observations (« Quick method ») : on peut citer la « two-point method » (Elliott et Walker, 1982) utilisée par les modèles WinSRFR et SIRMOD III afin d'estimer les paramètres d'infiltration, l'« advance method » (Benami et al., 1983), la « Shepard one-point method » (Shepard et al., 1993), l'« INFILT optimisation method » (McClymont and Smith 1996) et la « Valiantzas one-point method » (Valiantzas et al., 2001).
- D'autres approches utilisent plusieurs jeux d'observations (technique de multi calibration) comme dans le modèle SISCO. Différentes combinaisons sont possibles : coupler le temps d'avancement et le temps de récession avec le dynamique de ruissèlement (Gillies et Smith, 2005), combiner l'hydrogramme de flux d'eau en entrée et en sortie (Walker, 2005), coupler le temps d'avancement et de récession avec le dynamique de ruissèlement et la

concentration de flux de nitrate (Sedaghatdoost et Ebrahimian, 2015), coupler une « two-point method » avec les formes des hydrogrammes de ruissellement (Moravejalahkami et al., 2009).

1.2.6 Conclusion

Le déversement de l'eau dans une parcelle agricole irriguée par un système d'irrigation gravitaire se traduit par deux processus principaux : la propagation de l'eau dans le sens de la pente et l'infiltration dans le sol. La compréhension et la modélisation de ces processus et de leur couplage est très importante dans une optique de meilleure gestion de l'eau et des pratiques de conservation des ressources en eau dans les nombreuses situations où l'irrigation gravitaire est utilisée.

Des modèles mathématiques ont été développés pour décrire ces systèmes. Ils prennent en compte les principes de conservation de la masse et de conservation de la quantité de mouvement qui conduisent aux équations de Saint Venant, sous la forme complète (hydrodynamique complète) ou, plus fréquemment, sous une de ses formes simplifiées (sans inertie, onde cinématique). En règle générale, l'équation utilisée pour décrire la relation entre la hauteur d'eau et le débit est celle de Manning-Strickler.

La propagation de l'eau à la surface peut être caractérisée par la mesure de la résistance d'une parcelle à l'écoulement. Cette résistance peut s'exprimer par un coefficient de frottement incluant la friction hydraulique à la surface du sol et celle induite par le couvert végétal.

La modélisation du ruissellement, de sa propagation et le calcul du volume d'eau instantané stocké à la surface du sol dans les systèmes d'irrigation traditionnelle sont contraints par la connaissance de ce paramètre hydraulique et par la difficulté de l'estimer précisément, ce paramètre étant dans une large mesure de nature empirique.

Si l'équation de Manning-Strickler est généralement utilisée, d'autres équations peuvent également être utilisées : il s'agit des équations de Chézy ou de Darcy-Weisbach. Ces équations introduisent des coefficients de frottement hydraulique différents : le coefficient de rugosité de Manning (noté classiquement n) ou de Strickler (noté classiquement $k=1/n$), le facteur de résistance de Chezy, et le coefficient de frottement de Darcy-Weisbach. Seul le coefficient de Darcy-Weisbach est adimensionnel. Ces paramètres sont influencés par les conditions de l'écoulement : débit ruisselé, hauteur de la lame d'eau, vitesse d'avancement du flux, état de surface du sol, développement végétal (LAI), pente de la surface irriguée et microtopographie du sol.

L'infiltration de l'eau dans le sol permet de reconstituer la réserve hydrique du sol, et donc la quantité d'eau utile pour la culture, mais elle génère également des pertes par drainage profond sous la profondeur maximale d'enracinement.

De nombreux modèles sont utilisés pour représenter l'infiltration. Ils sont développés à partir de bases physiques ou de façon empirique à partir des expérimentations. Ces modèles estiment le flux d'infiltration, qui est très important pour déterminer la durée efficace de l'irrigation, et la quantité d'eau infiltrée dans le sol. La connaissance, par mesure ou calcul, de cette dernière est nécessaire afin d'établir un bilan hydrique à l'échelle de la parcelle

Afin de concevoir un système d'irrigation efficace, il est nécessaire d'estimer précisément les paramètres déterminant la dynamique de flux d'eau : le ruissellement à la surface du sol et l'infiltration dans le profil du sol. Cette détermination pourra nous aider à optimiser l'irrigation en ayant une infiltration désirée avec un apport d'eau le plus faible possible.

Différents modèles opérationnels existent permettant de caractériser, analyser et gérer l'irrigation gravitaire par submersion. Chaque modèle diffère selon le choix des équations pour décrire le ruissellement et l'infiltration, les paramètres utilisés, la possibilité de calibrer des paramètres selon différents jeux de données, et les variables de sorties calculées. Le modèle CALHY présente les avantages suivants :

- c'est un modèle mécaniste qui fait intervenir des paramètres qui ont un sens physique et dont certains peuvent être mesurés,
- c'est un modèle qui a déjà été utilisé avec succès pour décrire l'irrigation sur les prairies de Crau ,
- c'est un modèle dont nous avons pu nous procurer les codes sources très rapidement !

1.3 Chapitre 3 : Démarche globale (organisation du travail)

L'optimisation de l'irrigation gravitaire nécessite la bonne connaissance du fonctionnement de ce système. Nous proposons de mettre en place un système numérique fournissant des informations sur la dose d'eau apportée à la parcelle, l'infiltration et les autres composantes du bilan hydrique. Ce système se compose d'un modèle physique d'irrigation et d'une série de procédures numériques permettant de calibrer le modèle à partir de mesures in-situ.

Le modèle de ruissellement inclut la description des deux principaux processus de l'irrigation gravitaire : ruissellement à la surface de la parcelle et infiltration dans le sol.

Pour pouvoir utiliser le modèle pour quantifier les doses d'irrigation et la proportion qui en est drainée, ainsi que pour proposer des stratégies d'optimisation de l'irrigation gravitaire, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des paramètres en entrée. Ceux-ci ne sont pas toujours faciles à déterminer, même lorsqu'ils sont mesurables, en particulier à l'échelle d'une parcelle au sein de laquelle il existe une variabilité spatiale. Il est donc nécessaire de développer des stratégies permettant de déterminer ces paramètres.

Dans un premier temps, il est nécessaire de classer les paramètres en fonction de leur influence sur les variables qui nous intéressent en sortie du modèle, dans notre cas les variables décrivant le bilan hydrique de la parcelle. Pour cela nous allons utiliser une méthode d'analyse de sensibilité qui permet de déterminer l'influence de chaque paramètre sur les variables de sortie.

Les paramètres qui apparaissent comme ayant le moins d'influence sur les variables d'intérêt pourront être fixés à des valeurs nominales approchées à partir de mesures ou d'informations de la littérature. Ceux qui ont le plus d'importance sont des paramètres critiques qui devront en revanche être estimés ou mesurés le plus correctement possible.

L'estimation des paramètres critiques peut s'effectuer en utilisant des variables mesurables qui leur sont sensibles et en inversant le modèle au moyen d'algorithme d'inversion. Les variables d'intérêt ne sont pas toujours facilement mesurables (cas par exemple du flux d'eau drainé) et il est alors nécessaire d'utiliser d'autres variables, les proxy-variables, qui sont les plus faciles à mesurer tout en étant sensibles aux paramètres recherchés. Les variables mesurables adéquates ou les « proxy-variables » associées seront identifiées en mettant en œuvre une démarche d'analyse de sensibilité similaire à la démarche précédente. A l'issue de cette seconde phase d'analyse de sensibilité, l'objectif sera d'avoir défini une configuration

expérimentale capable de fournir les informations suffisantes pour estimer les paramètres critiques du modèle d'irrigation.

La méthode d'inversion sera alors mise en œuvre sur le terrain. Elle sera évaluée sur plusieurs critères :

- la qualité d'estimation de chaque paramètre, la cohérence des estimations, la comparaison des paramètres estimés à des valeurs mesurées...
- la qualité de la reconstitution des variables mesurées,
- la capacité du modèle à simuler des irrigations indépendantes.

Lorsque le modèle a été caractérisé, il devient possible de l'utiliser pour analyser le fonctionnement d'une irrigation en fonction des caractéristiques des parcelles (dimension, pente, type de sol...) et des manières d'injecter l'eau dans les parcelles. On peut ainsi tester différents scénarios pour proposer des voies d'optimisation de l'irrigation à l'échelle de la parcelle. Ces scénarios peuvent concerner différents critères comme le bilan hydrique, le temps d'arrosage, l'homogénéité de l'infiltration, le coût d'aménagement des infrastructures à réaliser...

Ces scénarios d'optimisation peuvent avoir un impact sur l'aquifère de la Crau du fait de la modification des quantités d'eau drainée qu'il est nécessaire de quantifier.

La quantification de l'évolution du bilan hydrique de la nappe de la Crau avec le simulateur Multisimlib et l'évaluation des effets des scénarios d'optimisation proposés sur la dose d'irrigation nécessitent la connaissance de la dose réelle appliquée à cette échelle. Dans ce travail de thèse, parallèlement à la modélisation physique de l'irrigation, nous proposons des relations empiriques entre les doses d'irrigation et les facteurs principaux caractérisant les conditions d'irrigation tels que la géométrie des parcelles et le débit d'injection.

2 Partie 2 : Matériels et Méthodes

Dans cette partie, je décris l'ensemble des outils et méthodes utilisés dans mon travail de thèse.

Le premier chapitre est consacré à la description du modèle Calhy (Bader et al., 2010), largement utilisé dans la thèse. Nous montrons que les paramètres intervenant dans ce modèle sont difficilement mesurables à l'échelle de la parcelle, et donc qu'ils doivent être estimés à partir d'un dispositif expérimental adéquat dont les caractéristiques sont décrites à la fin de ce premier chapitre.

Le second chapitre est dédié à la description du dispositif expérimental utilisé d'une part pour suivre la variabilité des pratiques d'irrigation chez les agriculteurs, et d'autre part pour mieux comprendre les processus d'infiltration et de ruissellement sur une parcelle expérimentale située au domaine du Merle (Salon de Provence).

Les enquêtes réalisées chez les agriculteurs, en complément du suivi des irrigations, sont décrites dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des méthodes numériques de caractérisation du modèle Calhy : la méthode d'analyse de sensibilité utilisée (méthode eFAST) et la méthode d'inversion (utilisant l'algorithme du SIMPLEX) sont décrites.

2.1 Chapitre 1 : Le modèle d'irrigation gravitaire CALHY

2.1.1 Présentation du modèle

Le modèle Calhy (Bader et al., 2010) décrit l'irrigation par submersion d'une parcelle agricole. Il fonctionne à l'échelle de la parcelle et de l'évènement d'irrigation. Il a été utilisé pour ce travail. Il est initialement écrit sur une plate-forme MS Excel. Il a été recodé sous l'environnement Matlab au cours de notre travail afin de pouvoir aisément lancer de nombreuses simulations et pouvoir l'interfacer avec différentes techniques numériques d'analyse de sensibilité ou d'inversion.

C'est un modèle monodimensionnel. Il représente la progression de la lame d'eau selon l'axe de propagation du ruissellement (la pente de la parcelle agricole). Il simule l'avancement de l'eau à la surface de la parcelle, l'état pseudo-permanent lorsque la lame d'eau est plus ou moins constante sur la parcelle, et la phase de récession après l'arrêt de l'irrigation. Cette dynamique du ruissellement est couplée à l'infiltration de l'eau dans le profil du sol. Les équations mises en œuvre dans ce modèle (voir après) sont discrétisées en temps et en espace selon des pas réguliers. Le modèle fonctionne à l'échelle parcellaire et calcule à chaque pas de temps et d'espace :

- la position du front de ruissellement sur la parcelle et le temps d'arrivée de ce front à chaque abscisse,
- l'évolution de la lame d'eau en surface H (m),
- la lame infiltrée depuis le début de l'irrigation F (m),
- l'intensité d'infiltration f (m s^{-1}),
- le débit ruisselé Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A la fin de la simulation, le modèle peut calculer le bilan hydrique de la parcelle :

- quantité d'eau entrante,
- quantité d'eau perdue à l'exutoire de la parcelle,
- quantité d'eau infiltrée à la surface du sol,
- quantité d'eau stockée dans le profil de sol et perdue par drainage profond.

Pendant la durée de l'irrigation, l'évapotranspiration de la parcelle est supposée nulle : cela peut être un biais dans le calcul du bilan hydrique, une irrigation pouvant durer plusieurs heures. Ce biais est négligé compte tenu des grandes quantités d'eau apportées par ce système d'irrigation par submersion.

De plus, des fonctionnalités supplémentaires ont été incorporées dans la version Matlab du modèle Calhy :

- un critère d'arrêt paramétrable de l'irrigation est disponible : l'injection d'eau à la surface de la parcelle est stoppée lorsque le front de d'irrigation atteint une certaine distance (paramétrable) du bout de la parcelle (par exemple lorsque le front atteint 90% de la longueur totale),
- le débit total ou partiel peut être injecté latéralement sur une certaine distance de la longueur de la parcelle.

Ces nouvelles fonctionnalités sont présentées dans le Chapitre 3.3.

Les notations suivantes sont utilisées dans ce chapitre :

- x est la distance entre l'amont de la parcelle où l'eau d'irrigation est injectée et le point considéré (m),
- t est le temps qui s'est écoulé depuis le début de l'irrigation (s),
- Q_{rl} est le débit par unité de largeur ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) ruisselant à la surface de la parcelle,
- H est la hauteur d'eau à la surface de la parcelle (m),
- H_0 est la quantité d'eau stockée dans les micro-reliefs à la surface du sol (m),
- f est le flux instantané d'infiltration (m s^{-1}) ; ce flux est positif si de l'eau s'infiltré dans le sol,
- F est l'infiltration cumulée dans le sol depuis le début de l'irrigation (m),
- l, L, Z, I sont respectivement la largeur (m), la longueur (m), la profondeur de sol (m) et la pente (m m^{-1}) de la parcelle,
- Q_i est le débit par unité de largeur injecté en amont de la parcelle ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

Les différentes variables Q_{rl} , H , f et F sont calculées à chaque pas de temps et d'espace. Par définition, on a :

$$F(x, t) = \int_{\tau=0}^{\tau=t} f(x, \tau) d\tau \quad (18)$$

Nous avons utilisé les hypothèses suivantes concernant les écoulements à la surface du sol :

- l'écoulement à la surface du sol est unidimensionnel dans le sens de la pente de la parcelle,
- l'écoulement peut être décrit par l'approximation des ondes cinématiques des équations de Saint Venant (Eq.2),
- avant que l'écoulement puisse se propager en aval, la quantité d'eau H_0 doit être stockée à la surface du sol,
- la relation entre le débit par unité de largeur et la hauteur d'eau est décrite par l'équation de Manning-Strickler (Eq.20),

L'ensemble de ces hypothèses conduit au système d'équations suivant dérivé de l'équation de conservation de la masse de Saint Venant (Eq. 1) :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = -f \quad (19)$$

$$Q_{rl} = k \times \max(0; H - H_0)^{5/3} I^{1/2} \quad (20)$$

où k ($m^{1/3} s^{-1}$) est le coefficient de frottement hydraulique de Strickler.

Nous avons considéré les hypothèses suivantes concernant l'infiltration dans le sol :

- l'infiltration peut être décrite par l'équation de Green et Ampt (Eq.16),
- le sol peut être considéré soit comme un milieu homogène semi-infini, soit comme un milieu homogène d'épaisseur finie avec une condition de drainage libre en limite inférieure.

Ceci conduit à l'équation suivante dans le cas d'un sol semi-infini :

$$f = K_s \left(1 + \frac{(\theta_s - \theta_i)(P_{ini} + H)}{F} \right)$$

Dans le cas d'un sol d'épaisseur finie Z , on obtient le système d'équations suivant :

$$f = K_s \left(1 + \frac{(\theta_s - \theta_i)(P_{ini} + H)}{F} \right) \text{ si } F < Z(\theta_s - \theta_i)$$

$$f = K_s \left(1 + \frac{H}{Z} \right) , \text{ si } F \geq Z(\theta_s - \theta_i)$$

Dans les équations précédentes, K_s est la conductivité hydraulique du sol à saturation (m s^{-1}), θ_s (respectivement θ_i) est la teneur en eau à saturation (respectivement teneur en eau initiale) du sol ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) et P_{ini} est le potentiel de succion au niveau du front d'infiltration (m).

2.1.2 Critique des hypothèses du modèle de Green et Ampt

Le modèle de Green et Ampt est adapté à la description de l'infiltration dans un milieu très poreux (sableux ou avec une macrostructure développée) dans lequel le front d'infiltration va se propager sans déformation (« infiltration en piston »). D'un point de vue théorique, le modèle de Green et Ampt correspond à un sol dont la conductivité hydraulique présente la forme d'une fonction de Dirac : elle est nulle quelle que soit la teneur en eau sauf à la saturation où elle est égale à K_s (Kutílek et al., 1994). D'un point de vue physique, en règle générale la déformation du front d'infiltration est d'autant plus importante que la texture du sol est « fine » ou argileuse. En effet, on observe en général que les propriétés hydrodynamiques d'un sol sableux (courbe de rétention et de conductivité hydraulique) varient très fortement sur une faible gamme de potentiel hydrique : elles se rapprochent donc des hypothèses du modèle de Green et Ampt. La propagation sans déformation d'un front d'infiltration peut également se rencontrer lors des phénomènes d'infiltration rapide dans des sols très structurés présentant une forte macroporosité : les modèles d'écoulements préférentiels bien que basés sur des hypothèses différentes de celles du modèle de Green et Ampt, prédisent en effet une propagation du front d'infiltration sans déformation (Beven et Germann, 2013; Di Pietro et al., 2003). Dans le cas des sols de Crau que nous étudions, la présence d'une prairie permanente depuis plusieurs années ou décennies s'accompagne d'une forte macroporosité due à la micro et macrofaune du sol d'une part, et aux nombreux passages de racines d'autre part. De plus, le mode d'irrigation par submersion favorise l'apparition d'un front d'infiltration qui va se propager rapidement en profondeur en particulier en empruntant les nombreux macropores. Nous considérons donc que les hypothèses du modèle de Green et Ampt sont satisfaites dans notre étude.

De plus, le sol repose sur une couche appelée « taparas » qui est une sorte de poudingue induré mais très perméable à grande échelle : des essais menés en particulier au domaine du Merle par Ma et al. (2011) montrent que moins de 10 h après le début de l'irrigation, l'eau apportée par l'irrigation a rejoint la nappe située 7 m plus bas en traversant le taparas. Inversement, des essais d'infiltration réalisés localement sur le domaine du Merle montrent que la conductivité hydraulique à saturation à petite échelle est très faible : Juliand (2011)

calcul des conductivités à saturation de 1.7 mm h^{-1} et 3.5 mm h^{-1} (entre $5 \cdot 10^{-7}$ et 10^{-6} m s^{-1}) sur deux essais de type « simple anneau » réalisés sur du taparas non altéré. Dix essais d'infiltration de type Porchet réalisés en 2009 (ICF Environnement, 2009) sur le taparas dans le cadre de la réhabilitation des sols de coussoul pollués par la rupture du pipeline sur la commune de Saint Martin de Crau montrent des « capacités d'infiltration », assimilables à la conductivité hydraulique à saturation, variant entre 10^{-5} et $4 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ pour le taparas non altéré, et variant entre $2 \cdot 10^{-4}$ et 10^{-1} m s^{-1} pour du taparas altéré. 80% des essais montrent une capacité d'infiltration entre $5 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$, la valeur médiane étant de $2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Dans tous les cas, ces essais, conduits avec des techniques différentes, ont été réalisés sur la même unité géologique de la « Crau de Miramas ». Ces résultats montrent que les conductivités hydrauliques du taparas peuvent être très variables (environ 6 ordres de grandeur !).

Dans ce travail, on considère que l'hypothèse, soit de sol homogène semi-infini, soit de sol d'épaisseur fini reposant sur un substratum beaucoup plus perméable est valable à l'échelle de la parcelle agricole, malgré de possibles effets locaux où le taparas constituerait un frein à l'infiltration.

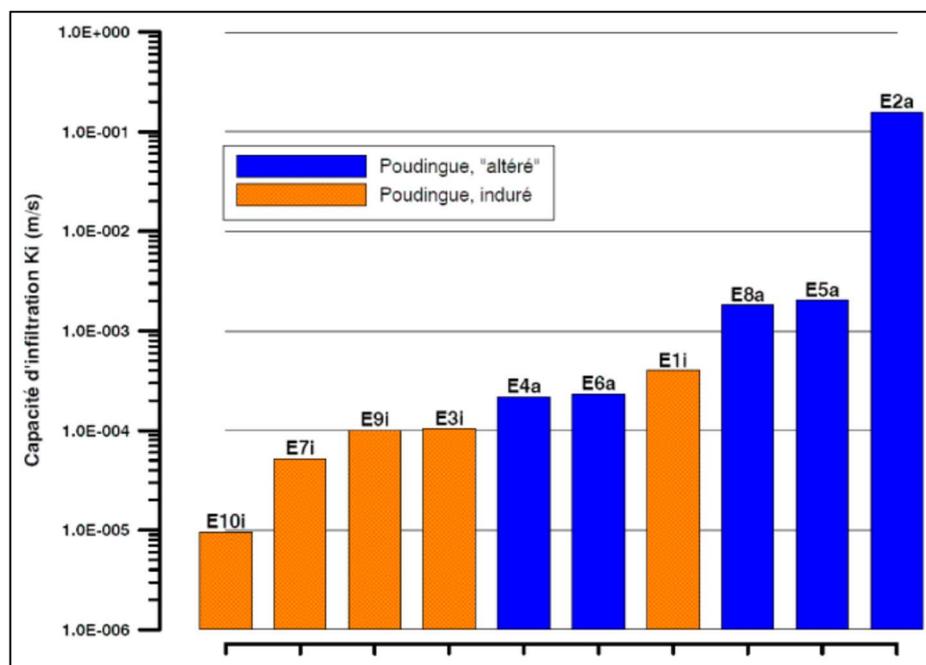


Figure 2-1: Résultats des essais d'infiltration à charge constante de type "Porchet" réalisé sur le poudingue induré ("taparas") de la Crau de Miramas au Nord de Fos sur Mer. D'après la figure 12 de (ICF Environnement, 2009).

2.1.3 Signification et estimation des paramètres hydrauliques et hydrodynamiques du modèle Calhy.

Le modèle CALHY fait intervenir 7 paramètres qu'il faut déterminer. Ces paramètres peuvent être variables spatialement, mais dans ce travail nous considérerons que les paramètres sont constants sur une parcelle donnée.

Ces paramètres peuvent se regrouper en 3 catégories.

- Deux paramètres expriment l'état initial du sol avant l'irrigation. Il s'agit de θ_i qui est la teneur en eau volumique du sol avant l'irrigation (m^3m^{-3}) et de P_{ini} qui est le potentiel de succion capillaire initiale du sol (m).
- Trois paramètres expriment l'état du sol et de la végétation. Il s'agit de k : le coefficient de frottement hydraulique de Strickler ($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$), de H_0 : la quantité d'eau qui peut être piégée dans le microrelief du sol (m) et de Z : la profondeur du sol (m).
- Deux autres paramètres caractérisent le sol de façon intrinsèque. Il s'agit de θ_s : la teneur en eau à saturation du sol ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) et de K_s la conductivité hydraulique à saturation (m s^{-1}).

Les paramètres θ_i , P_{ini} , k et H_0 peuvent être variables au cours du temps.

- θ_i est la teneur en eau du sol au début de l'irrigation. Sa valeur va donc dépendre, depuis la dernière irrigation qui a saturé le sol, de la demande climatique (évapotranspiration de référence ET_0), du stade de développement de la prairie (que l'on peut traduire par le LAI) et de l'évapotranspiration réelle ETR, et enfin des pluies qui ont pu réhumecter le sol.
- P_{ini} est corrélé avec θ_i (Bader et al., 2010; Gardner, 1956; Lebeau and Konrad, 2010; Morel-Seytoux, 2012).
- Pour un sol nu, H_0 représente la « détention superficielle » qui est la quantité d'eau maximale qui peut être stockée dans la rugosité de surface du sol avant le déclenchement généralisé du ruissellement. En présence de végétation ou de résidus de végétation (mulch), ce qui est le cas pour les prairies de foin de Crau, la valeur de H_0 est plus forte que pour le sol nu car la végétation augmente la rugosité de surface.
- Le coefficient de frottement hydraulique est lui aussi fonction du type de végétation présent et de son développement. Différentes études montrent que le coefficient de Manning ou de Strickler est fonction de la végétation (Clemmens et al., 1998; Kim et

al., 2012; Robertson et al., 2004; Wilson, 2007). La composition floristique des prairies de foin de Crau et les parts relatives des graminées, légumineuses et autres plantes, évoluent au cours des trois coupes successives. Le port de ces diverses plantes et catégories étant très différent (cf Figure 1-12), le frottement hydraulique va dépendre a priori de la position de l'irrigation par rapport aux coupes successives, et de l'état de développement de la prairie.

Inversement, les paramètres K_s , θ_s et Z ne varient pas au cours du temps sur une parcelle donnée : ce sont des paramètres descriptifs du sol en place.

De plus, les paramètres θ_i et θ_s sont combinés et c'est leur différence $\Delta\theta$ qui est utilisée dans le modèle : ce nouveau paramètre, qui représente le déficit de saturation du sol ($m^3 m^{-3}$) est donc variable d'une irrigation à l'autre.

L'ensemble de ces paramètres doit être renseigné pour pouvoir utiliser le modèle. On peut classer ces paramètres en deux catégories selon la possibilité de les mesurer ou pas.

- Les paramètres $\Delta\theta$ et K_s peuvent être mesurés ponctuellement sur une parcelle.
 - De nombreuses méthodes de laboratoire (perméamètre à charge constante ou à charge variable) ou de terrain (méthode du double anneau de Müntz, méthode simple anneau de type « BeerKan », test d'infiltrométrie) permettent une mesure ponctuelle de la conductivité hydraulique à saturation (Angulo-Jaramillo et al., 2000; Chossat, 2005; Lassabatere et al., 2006). Cependant, de nombreux résultats obtenus dans des conditions très variées montrent que la conductivité hydraulique à saturation est très variable spatialement : une différence de 1 ou 2 ordres de grandeur peut être observée (voir par exemple Nielsen et al. (1973), cité dans Kutilek et Nielsen (1994)). De plus, la taille de l'échantillon sur lequel porte la mesure est limitée, la section horizontale de l'échantillon variant typiquement entre 1 dm^2 en laboratoire à 1 m^2 au maximum in situ. Ceci soulève deux difficultés :
 - d'une part, un grand nombre d'échantillons est nécessaire pour obtenir une valeur moyenne avec une faible incertitude,
 - d'autre part, quelle méthode utiliser pour calculer une conductivité effective à l'échelle de la parcelle dont la superficie est de l'ordre de l'hectare ?

- Les mesures de teneur en eau peuvent être réalisées soit à partir de prélèvements à la tarière ou au cylindre, soit à partir de capteurs automatiques tels que des sondes capacitatives, FDR ou TDR, soit à partir de sonde à neutron. Là aussi il s'agit de mesures ponctuelles, variables spatialement.
- Les paramètres H_0 , k et P_{ini} ne peuvent être mesurés in situ. Il s'agit typiquement de paramètres qui, s'ils ont une signification physique réelle, ne peuvent pas être mesurés facilement in situ.
 - Kamphorst et al. (2000) ont proposé des algorithmes de remplissage pour calculer H_0 soit à partir d'une cartographie 3D du microrelief de sol, soit à partir d'indice de rugosité. Ceci peut être réalisé sur un sol nu mais ne peut pas être réalisé en présence de végétation.
 - Le paramètre k est généralement obtenu par ajustement ou inversion à partir d'expérimentations spécifiques (voir par exemple Davis et al. (1980); Harun-ur-Rashid (1990); Li et Zhang (2001); Ree (1949); Robertson et al. (2004) : les valeurs trouvées sont très variables et semblent dépendre des conditions expérimentales qui ont servi à les estimer par ajustement ou inversion.
 - Le paramètre P_{ini} est un paramètre empirique. P_{ini} peut être ajusté à partir des propriétés texturales des sols (Rawls et Brakensiek, 1989).

Au cours de ce travail de thèse, nous avons cherché à déterminer une configuration expérimentale permettant, en lien avec le modèle Calhy utilisé en mode inverse, de déterminer les paramètres hydrauliques et hydrodynamique. Ceci est présenté dans la section suivante.

2.1.4 Détermination par modélisation d'une configuration expérimentale permettant l'estimation des paramètres hydrauliques et hydrodynamiques du modèle Calhy.

La prédétermination de la méthode de mesure permettant d'estimer les paramètres de Calhy nécessite d'établir une analyse de sensibilité préliminaire. Ceci nous a permis de définir des variables mesurables sur terrain et dont les variations sont sensibles aux paramètres du modèle.

Dans un second temps, nous avons utilisé ces variables comme données synthétiques dans une procédure d'inversion du modèle pour étudier la possibilité de mettre en place un dispositif expérimental permettant de déterminer les paramètres du modèle.

Les conditions de simulation sont les suivantes. Ces caractéristiques, proches de la parcelle 1J du Domaine du Merle, sont des valeurs typiques que l'on peut rencontrer sur le territoire de la Crau.

Paramètre	Longueur de la parcelle L (m)	Largeur de la parcelle l (m)	Débit d'irrigation Q_i ($l\ s^{-1}$)	Pente de la parcelle I ($m\ m^{-1}$)	Profondeur du sol Z (m)	Durée de l'irrigation (h)
Valeur	410	49	130	0.003	0.6	6.43

Tableau 2.1: Caractéristiques physiques de la parcelle utilisées pour l'analyse de sensibilité et l'inversion du modèle CALHY.

2.1.4.1 Analyse de sensibilité

Les cinq paramètres d'entrée de Calhy (sachant que $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$) ont été étudiés, chaque paramètre a pris trois valeurs différentes (voir Tableau 2.2). Les valeurs étudiées correspondent à des valeurs attendues sur la Crau (cf. par exemple Bader et al. (2010); Mailhol et Merot (2008)) Pour chaque combinaison de paramètres, nous avons utilisé le modèle Calhy pour simuler l'évolution de la lame d'eau à la surface de la parcelle à trois abscisses: 52 m, 165 m et 224 m de l'entrée de la parcelle. Cinq paramètres d'entrée de Calhy ont été étudiés. Trois valeurs différentes représentatives de la gamme de variation attendue ont été données à chaque paramètre. Au total, nous avons réalisé $3^5 = 243$ simulations.

	1	2	3
K_s (m/s)	1,5E-06	1,5E-07	4,5E-06
$\Delta\theta$ (m ³ /m ³)	0,1	0,07	0,13
H_0 (mm)	12,4	10	15
k (m ^{1/3} /s)	3,28	2,28	4,28
P_{ini} (m)	5,65	3,65	7,65

Tableau 2.2, Les valeurs des cinq paramètres choisis pour l'analyse de sensibilité.

L'évolution de la lame d'eau à la surface du sol aux trois abscisses est donnée sur la Figure 2-2 pour un jeu donné de paramètres. Les caractéristiques suivantes de ces évolutions ont été étudiées :

- H_{max} (mm) représente la hauteur maximum de la lame d'eau à une abscisse donnée,

- T_{arrive} (h) identifie le temps nécessaire pour que la lame d'eau arrive à cette abscisse,
- T_{propag} (h) représente le temps de propagation de la lame d'eau d'une abscisse à l'autre : c'est la différence entre deux valeurs successives de T_{arrive} .

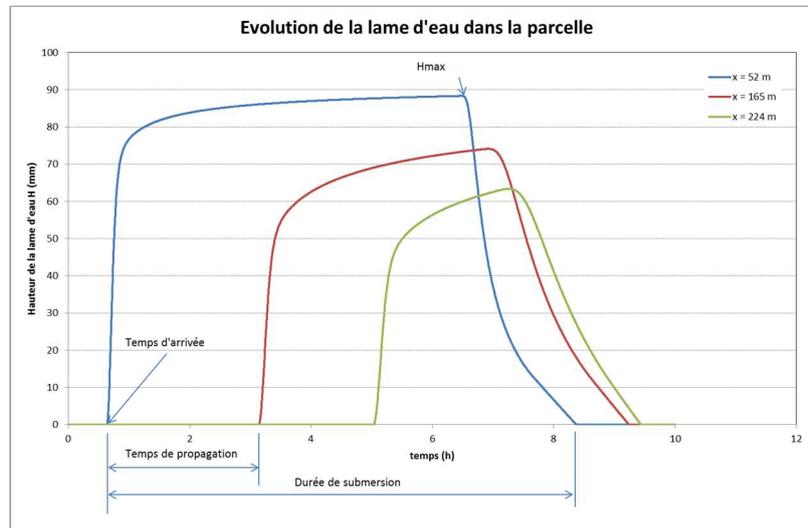


Figure 2-2, Évolution de la lame d'eau en trois points de la parcelle et caractéristiques étudiées de ces évolutions.

Nous avons ensuite calculé les corrélations, simples ou multiples, entre chaque variable et les différents paramètres : un fort coefficient de corrélation indique que la variable est sensible au paramètre, alors qu'au contraire une faible valeur du coefficient de corrélation indique une faible sensibilité. L'ensemble des résultats est présenté en annexe (1). On montre que :

- la variable H_{max} est sensible au coefficient de frottement k en amont avec un coefficient de détermination de 0.79 (forte sensibilité), tandis qu'aucune sensibilité n'a été trouvée entre cette variable et les autres paramètres,
- la variable T_{arrive} en aval est sensible à la conductivité hydraulique à saturation K_s ($R^2 = 0.81$) et est très peu sensible aux autres paramètres,
- la variable T_{propag} présente une sensibilité encore plus forte au paramètre K_s : le coefficient de détermination a augmenté jusqu'à $R^2 = 0.91$.

2.1.4.2 Inversion préliminaire

Dans un premier temps, des données synthétiques ont été générées en utilisant le modèle à partir de valeurs fixées des paramètres. Les données utilisées sont l'évolution de la hauteur d'eau H en deux positions sur la parcelle, en amont pour estimer k à partir de H_{max} simulé et

en aval pour K_s à partir de T_{arrive} , avec un pas de temps 5 minutes. Dans un second temps, nous avons considéré que la valeur exacte de certains de ces paramètres était inconnue et à l'aide de la fonction SOLVER dans l'environnement d'EXCEL nous avons tenté de reconstituer les données synthétiques (considérées comme des observations) en faisant varier les valeurs du ou des paramètres inconnus à estimer. La convergence de l'algorithme est atteinte lorsque l'écart quadratique moyen ($RMSE$) entre données pseudo expérimentales et données simulées est minimum. L'ensemble des résultats est donné en annexe (2). On montre que :

- 1- lorsque seul le paramètre K_s est inconnu, celui-ci peut être très bien estimé à partir des données pseudo-expérimentales,
- 2- lorsque la valeur du paramètre K_s est inconnue et que la valeur des autres paramètres est fixée à une valeur légèrement différente de leur vraie valeur, dans 80% des cas, le paramètre K_s est estimé à un facteur 1.5 près,
- 3- lorsque l'ensemble des paramètres est inconnu, l'estimation précise de K_s est impossible,
- 4- lorsque seuls les paramètres K_s et k sont inconnus, K_s est estimé à un facteur 2 près et k est estimé à 10% près,
- 5- lorsque seuls les paramètres K_s et $\Delta\theta$ sont inconnus il est impossible d'estimer ces paramètres : nous pensons que cela est dû soit à une limitation de la procédure d'inversion utilisée (celle mise en œuvre dans la fonction SOLVER de EXCEL), soit à une corrélation forte entre K_s et $\Delta\theta$.

2.1.4.3 Conclusion

En conclusion, la caractérisation préliminaire du modèle Calhy nous a montré qu'un dispositif expérimental qui serait basé sur le suivi de la lame d'eau en entrée et sortie de parcelle, combiné à des mesures complémentaires en particulier sur la teneur en eau, fournirait suffisamment d'information pour estimer par inversion les paramètres hydrauliques k et hydrodynamiques K_s du modèle. Ceci devrait cependant être vérifié par une analyse de sensibilité plus précise.

2.2 Les sites expérimentaux et les protocoles expérimentaux

Des suivis expérimentaux de l'irrigation gravitaire ont été effectués sur une vingtaine de parcelles distribuées dans 13 exploitations de prairies irriguées. Ces exploitations ont été choisies de façon à représenter la diversité des prairies et exploitations rencontrées sur la Crau : différents types de sol, différentes zones géologiques de la Crau, différentes ASA et donc différents débits d'injection et calendriers d'irrigation, différents âges de prairie (jeune ou vieille) et différentes périodes au cours de la saison d'irrigation (d'avril jusqu'à octobre) entre les coupes de foin. Le Tableau 2.3 représente la diversité des exploitations où on a suivi les pratiques d'irrigation. La Figure 2-3 montre la distribution des sites expérimentaux sur toute la Crau.

N° d'exploitation	Mas ou domaine	N° d'épisode des suivis	Pente (%)	Longueur (m)	Largeur (m)	Age de prairie (an)	(débit/surface) (mm/hour)	Epaisseur de sol (mm)	Tour d'Irrigation (jour)	Duré d'Irrigation (heure)
1	Tout Se Sau	2	4.5	121	78	>60	26.3	350	10	2.5
2	Mas de la Tapie	3	18.1	130	60	>60	47	700	12	2
3	La Pologne	3	2.9	477	71	35	12.8	300	9	7-9
4	Domaine Grand Bois Vert	5	11.6	345	45	>100	17.4	400	10	6-7
5	Domaine le Merle	5	2.8	410	49	>60	26.5	600	8	6-7
6	Mas la Carougnade	3	3.5	630	70	40	26.5	175	10	12
8	Mas de Craponne	2	3.7	241	67	>60	31.4	200	10	4
9	Domaine de Suffren	2	2.5	554	40	55	20.5	300	10	9-10
10	Mas Rigaud	5	3	410	61	-	13	200	10	6
11	Mas du Graillon	2	2.5	554	40	55	20.5	300	10	9-10
12	Domaine de Vergières	1	2.9	730	65	35	17.8	300	10	8.5-9
13	Mas Chateau bellan	2	11.1	431	57	>60	38.1	600	12	11
14	Le Mazet	4	3.3	157	53	>70	27.7	350	10	2-2.5

Tableau 2.3 la diversité des parcelles où des suivis d'irrigation ont été effectués.

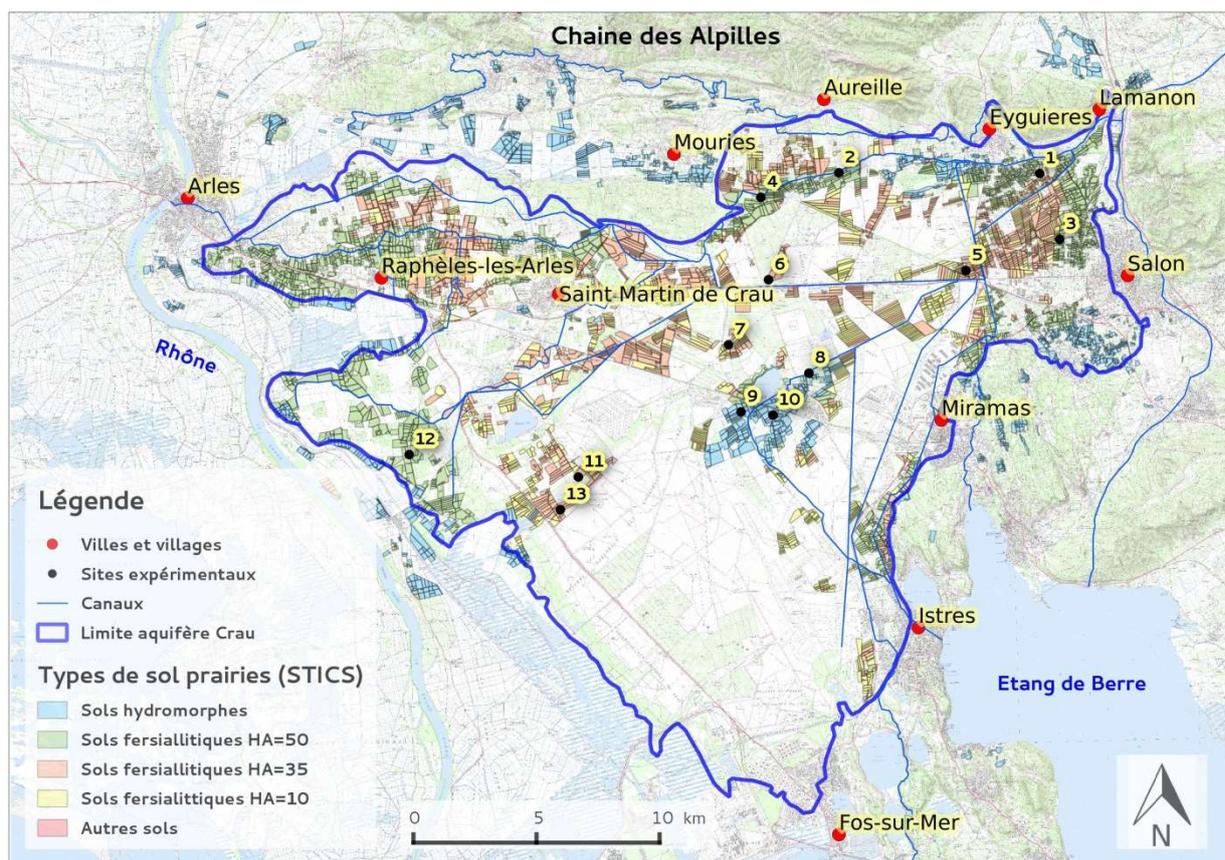


Figure 2-3 : la distribution des expérimentations parcellaires de suivis d'irrigation sur la plaine de la Crau.

Sur chaque parcelle choisie, différentes mesures expérimentales ont été effectuées :

- suivi de l'évolution de la hauteur de la lame d'eau au cours d'une irrigation dans les parties amont et aval de la parcelle (à une distance des extrémités de 10%, cf. Figure 2-4),
- suivi de l'avancement de la lame d'eau en fonction du temps,
- mesure des débits dans le canal d'amenée de l'eau d'irrigation de la parcelle,
- mesure des géométries des parcelles suivies (longueur, largeur et pente),
- profils de teneur en eau du sol avant et après l'irrigation,
- estimation de la couverture végétale (hauteur et densité des prairies à chaque irrigation suivie).

2.2.1 Suivi de l'évolution de la hauteur de la lame d'eau

2.2.1.1 Description du dispositif d'acquisition

La dynamique d'évolution de la lame d'eau a été suivie en deux positions sur la parcelle : à une abscisse située à 10% de la longueur totale de la parcelle depuis l'amont et la même

distance depuis l'aval (voir Figure 2-4). Sur les deux positions de mesure dans la parcelle, ces suivis ont été effectués à l'aide d'une centrale d'acquisition Campbell (Campbell Scientific CR1000) équipée d'un capteur de température (thermistance) installé dans les 10 premiers cm de sol, de 3 sondes capacitatives CS616 (Campbell Scientific) installées dans l'axe transversal de la parcelle. Les sondes CS616 se présentent sous la forme de 2 tiges de 30 cm de long. Chaque sonde est enfoncée verticalement depuis la surface du sol sur une profondeur de 10 cm, au moins 2 heures avant le début de l'irrigation. Les 20 cm restant sont donc à l'air libre : ils vont être en contact direct avec la lame d'eau afin de détecter et suivre son évolution. Le pas de temps d'acquisition des données est de 10 secondes. Durant le suivi, le début et la fin de l'irrigation sont également notés.

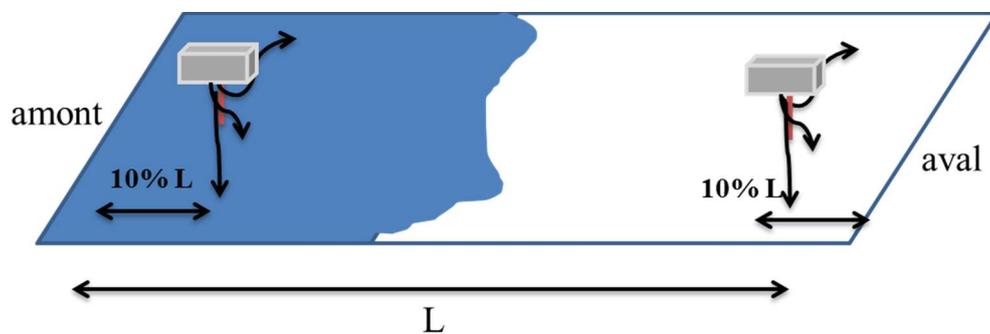


Figure 2-4: Schéma de l'implantation des sondes capacitatives en amont et en aval de la parcelle.

2.2.1.2 *Étalonnage des sondes CS616*

Six sondes capacitatives CS616 ont été utilisées afin d'enregistrer l'évolution de la lame d'eau pendant l'irrigation (annexe 3). Ces sondes de type FDR (Frequency Domain Reflectometry) sont constituées de deux tiges de 30 cm de long, 0.32 cm de diamètre et 3.2 cm d'espacement. Elles sont connectées à une centrale de mesure Campbell Scientific de type CR1000. Elles permettent normalement de mesurer la teneur en eau volumique du sol en générant une impulsion électromagnétique et en mesurant le temps de propagation de cette onde le long des tiges : la vitesse de propagation dépend de la permittivité diélectrique du milieu (le sol), qui est fortement influencée par sa teneur en eau (Wang et Schmugge, 1980), la permittivité diélectrique des particules solides étant de l'ordre de 3 à 8 unités, celle de l'air égale à 1 unité et celle de l'eau égale à 80 unités (Robinson et Friedman, 2003; Topp et al., 1980). Le signal délivré est donné en (μ s). Le fabricant fournit des relations empiriques permettant de convertir ce temps de trajet en teneur en eau volumique.

Nous avons détourné ces sondes de leur fonction première en profitant de la grande longueur des tiges avec l'objectif de les transformer en capteurs de hauteur d'eau. Pour cela, une étude préliminaire de sensibilité et d'étalonnage a été réalisée en laboratoire. Trois éléments ont été étudiés :

- la sensibilité des sondes à la conductivité électrique de l'eau dans laquelle seront immergées les tiges,
- la sensibilité des sondes à la température,
- la relation entre la hauteur d'eau et le signal mesuré.

Sensibilité à la température et à la salinité de l'eau

Pour analyser la sensibilité des mesures par les sondes à la température et la salinité de l'eau, les sondes CS616 ont été plongées dans un cylindre rempli d'eau. Les profondeurs d'enfoncement ont varié de 0 cm à 25 cm tous les 2 cm (Figure 2-5 (a)). Pour chaque profondeur d'enfoncement dans l'eau, 40 mesures du signal ont été réalisées. Trois types d'eau ont été utilisés :

- eau permutée,
- eau de nappe provenant du forage sur le site INRA de St Paul,
- eau permutée à laquelle du CaCl_2 à la concentration de 11 g/l a été ajouté.

Pour l'eau permutée, l'expérience a été réalisée trois fois en faisant varier la température : 10 °C, 20 °C, 30 °C.

Les sondes CS616 ont ensuite été étalonnées dans une configuration proche de celle qui sera rencontrée sur le terrain. Un cylindre en PVC de diamètre 40 cm et de hauteur 30 cm a été enfoncé de 5 cm dans le sol. Les sondes CS616 ont été positionnées à l'intérieur de ce cylindre : elles ont été enfoncées dans le sol selon trois profondeurs : 5 cm, 10 cm et 15 cm. Ensuite, des volumes d'eau croissants (prélevés dans la nappe sur le domaine St Paul de l'INRA d'Avignon) ont été rajoutés à l'intérieur du cylindre. On a mesuré de façon simultanée la hauteur d'eau présente dans le cylindre et le signal délivré après les sondes CS616. Ceci a été prolongé jusqu'à obtenir une hauteur d'eau d'environ 15 cm.

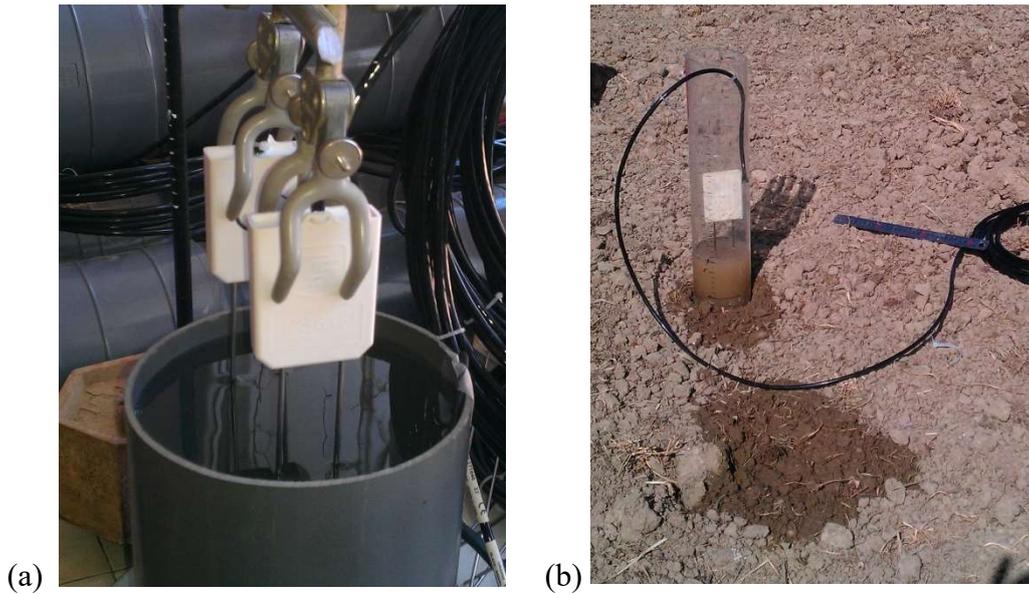


Figure 2-5: Dispositif d'étalonnage des sondes capacitatives CS616. (a) Pour étudier la sensibilité des signaux délivrés par les sondes aux différentes températures et niveaux de salinité de l'eau. (b) pour calibrer les signaux délivrés par rapport aux hauteurs d'eau observées.

Cette procédure d'étalonnage a été réalisée avant et après la campagne expérimentale. Lors du deuxième étalonnage seules les mesures avec un enfoncement des sondes de 10 cm ont été réalisées et le nombre de points de mesure a été augmenté pour affiner la relation d'étalonnage pour chacune des sondes.

2.2.1.3 Résultats

L'ensemble des résultats sont donnés en annexe (3). De façon synthétique, nous montrons que : les sondes ne sont pas sensibles à la température et à la conductivité électrique de l'eau pour l'eau permutée ou l'eau de nappe. L'eau contenant du CaCl_2 , plus conductrice, présente une conductivité électrique qui s'éloigne de celle rencontrée sur le terrain et perturbe le signal des sondes.

Concernant l'étalonnage, quelle que soit la profondeur d'enfoncement des sondes dans le sol, on observe une très bonne corrélation linéaire entre la hauteur d'eau et le signal délivré par la sonde : les coefficients de détermination varient entre 0.983 et 0.999. Sur le terrain, nous avons choisi une profondeur d'enfoncement de 10 cm qui représente un compromis entre la stabilité du dispositif (un enfoncement de 5 cm pourrait être insuffisant et entraîner la chute de la sonde lors de l'irrigation du fait de la force exercée par le courant et de la perte partielle de

cohésion du sol saturé) et une gamme de mesure permettant d'enregistrer des hauteurs d'eau de près de 15 cm (les hauteurs d'eau retrouvées sur le terrain étant généralement de l'ordre de 7 à 11 cm). La courbe d'étalonnage correspondante est présentée Figure 2-6.

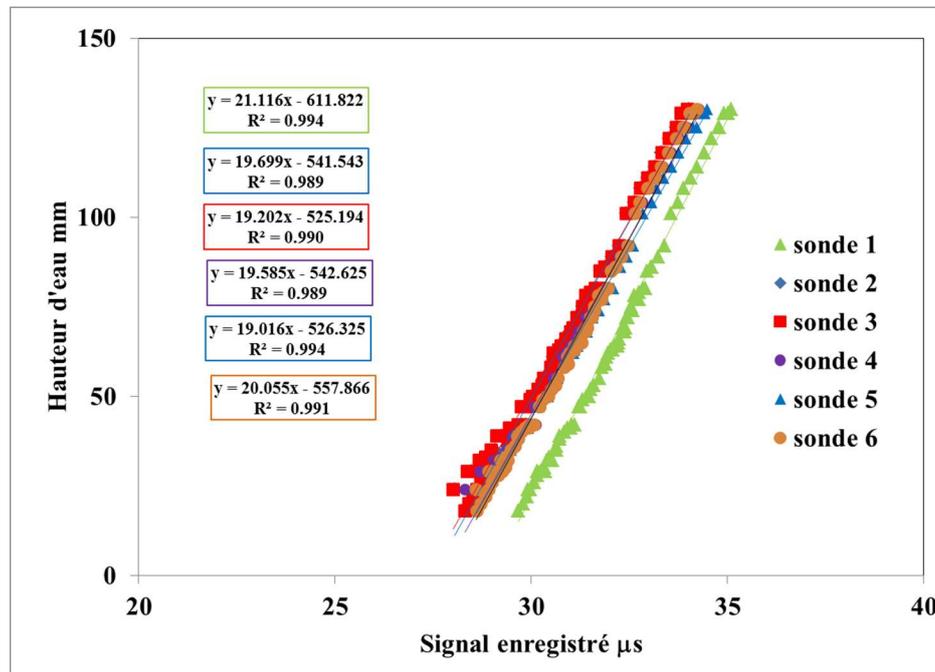


Figure 2-6: les courbes d'étalonnage après la campagne de suivi pour chaque sonde correspondant à une profondeur d'enfoncement des électrodes de 10 cm dans le sol.

2.2.2 Suivi de l'avancement de la lame d'eau au cours de l'irrigation

Sur deux épisodes de suivi, l'avancement de la lame d'eau a été repéré à intervalle régulier (toutes les 30 minutes) à l'aide de piquets implantés transversalement à la direction de propagation de la lame d'eau (voir Figure 2-7), depuis le début de l'irrigation jusqu'à l'arrivée du front de ruissellement dans le canal de colature de la parcelle. A chaque mesure, 5 piquets sont installés transversalement, ce qui permet d'estimer l'hétérogénéité d'avancement de la lame d'eau à la surface de la parcelle. Après l'irrigation, la position précise des piquets est mesurée à l'aide d'un décamètre et du GPS intégré dans un smartphone. Les distances précises sont ensuite calculées à l'aide de logiciel Arc GIS.

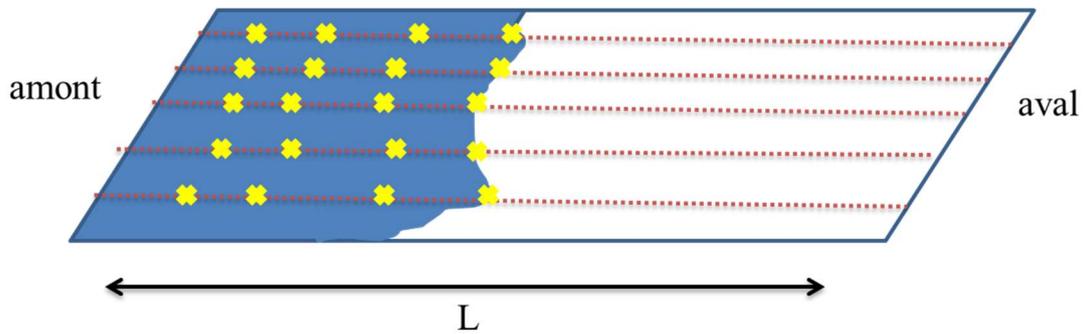


Figure 2-7: Schéma du suivi de l'avancement de la lame d'eau,

2.2.3 Mesures de débit

Ces mesures ont été réalisées sur les martelières situées au début des canaux qui amènent l'eau d'irrigation en amont de la parcelle. Dans la majorité des parcelles suivies, ces martelières prennent un format rectangulaire. Les mesures de vitesse V_i de l'écoulement au droit de la section de mesure sont réalisées généralement en 9 points de mesures ($i = 1..9$) répartis uniformément sur la section mouillée (voir Figure 2-8). Le courantomètre de marque OTT a été utilisé pour mesurer le débit d'injection dans les canaux d'amènée d'eau de l'irrigation en amont de la parcelle. Il se compose des parties suivantes :

- une tige métal ou perche graduée en cm afin de préciser la profondeur de mesure ; elle mesure 1.5 m de longueur et 9 mm de diamètre ;
- un corps de moulinet où l'hélice se positionne face au courant d'eau, l'ensemble étant fixé sur la tige après identification de la hauteur de mesure ; ici nous avons utilisé une hélice de type OTT n° 100.267 ;
- un compteur numérique qui comptabilise automatiquement le nombre de rotations d'hélice
- un câble de branchement raccordant le micro-moulinet avec le compteur.
- La vitesse du courant d'eau V_i en cm.s^{-1} est calculée en fonction du nombre n de tours de l'hélice du courantomètre par seconde, placée face au courant d'eau et enregistré pendant 45 secondes. Les équations d'étalonnages fournies par le mode d'emploi du courantomètre sont les suivantes :

$$V_i = 1.15 + 10.62 \times n \quad n \leq 2 \quad (21)$$

$$V_i = 1.21 + 10.59 \times n \quad 2 < n < 10 \quad (22)$$

En multipliant la vitesse de l'écoulement par la surface de chaque sous-section, on peut déduire le débit d'injection Q_i ($m^3 \cdot s^{-1}$) ainsi :

$$Q_i = \sum_{i=1}^{i=9} V_i \cdot P_i \cdot L_i \quad (23)$$

Avec :

V_i : vitesse d'écoulement ($m \cdot s^{-1}$)

L_i : largeur de la section élémentaire (m)

P_i : hauteur de la section élémentaire i (m)

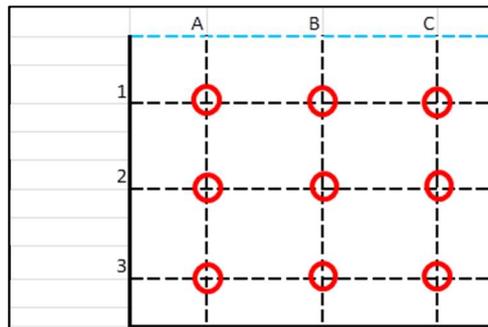


Figure 2-8: Schéma d'implantation des points de mesure de la vitesse d'écoulement dans une section transversale du canal d'amenée de l'eau.

2.2.4 Mesures des géométries des parcelles et de l'épaisseur du sol

Les géométries des parcelles suivies incluant la longueur et la largeur sont obtenues à partir de la carte des délimitations parcellaires sauvegardées dans la base des données de l'unité EMMAH. Ces données sont confirmées par les mesures sur terrain réalisées à l'aide d'un décimètre à chaque épisode du suivi.

La pente a été mesurée sur le terrain à l'aide d'un théodolite. Ceci a été réalisé sur toutes les parcelles suivies. Les mesures obtenues ont été confrontées à des calculs réalisés à partir du MNT de l'IGN disponible dans la base de données de l'UMR EMMAH : elles sont très similaires. Nous avons utilisé un Théodolite Electronique South ND 3000. Il a été utilisé pour mesurer la pente de la parcelle en se plaçant entre deux mires éloignées d'une distance L et en lisant les hauteurs de chaque mire h_1 et h_2 . La pente I est calculée comme suivant :

$$I = (h_2 - h_1) / L$$

où L est la distance entre les deux mires, calculée là aussi à partir des visées du théodolite sur la mire utilisée.

Des sondages (3 répétitions) à la tarière ont été réalisés à quatre endroits depuis le canal d'amenée en amont de chaque parcelle jusqu'à l'aval. L'épaisseur du sol est la moyenne des profondeurs atteintes lors de ces sondages.

2.2.5 La teneur en eau du sol

Des profils de teneur en eau du sol ont été réalisés avant et après chaque irrigation (en général le lendemain) sur chaque parcelle. Trois profils à la tarière ont été réalisés dans la partie amont de la parcelle, trois autres dans la partie aval. Les échantillons de sol ont été prélevés tous les 10 cm. Les échantillons prélevés sont pesés puis mis à l'étuve à 105 °C. Après 24h de séchage ils sont pesés à nouveau pour déterminer le poids sec. La teneur en eau massique W (g g^{-1}) est obtenue à partir des mesures sèches et humides. La teneur en eau volumique est calculée à partir de la teneur en eau massique et de la mesure de la densité apparente réalisée à l'aide de cylindres de 100 cm^3 . La teneur en eau volumique doit alors être corrigée pour tenir compte de la charge en cailloux. Nous avons utilisé les mesures réalisées par Juliand (2011) sur le domaine du Merle pour estimer la charge en cailloux.

2.3 Les enquêtes menées chez les exploitants agricoles

Afin de disposer d'équations simples permettant de calculer les doses d'irrigation apportées aux parcelles et pouvant être intégrées au simulateur Crau des relations empiriques expliquant la durée d'irrigation T_i et les doses injectées D_i ont été établies à partir d'enquêtes menées avec les agriculteurs dans la région de la Crau.

Ces relations ont été établies par des régressions linéaires simples ou multiples entre les deux variables T_i et D_i et des facteurs explicatifs fournis par les enquêtes.

Ceci sera décrit en détail sous forme d'article dans le chapitre 3.3

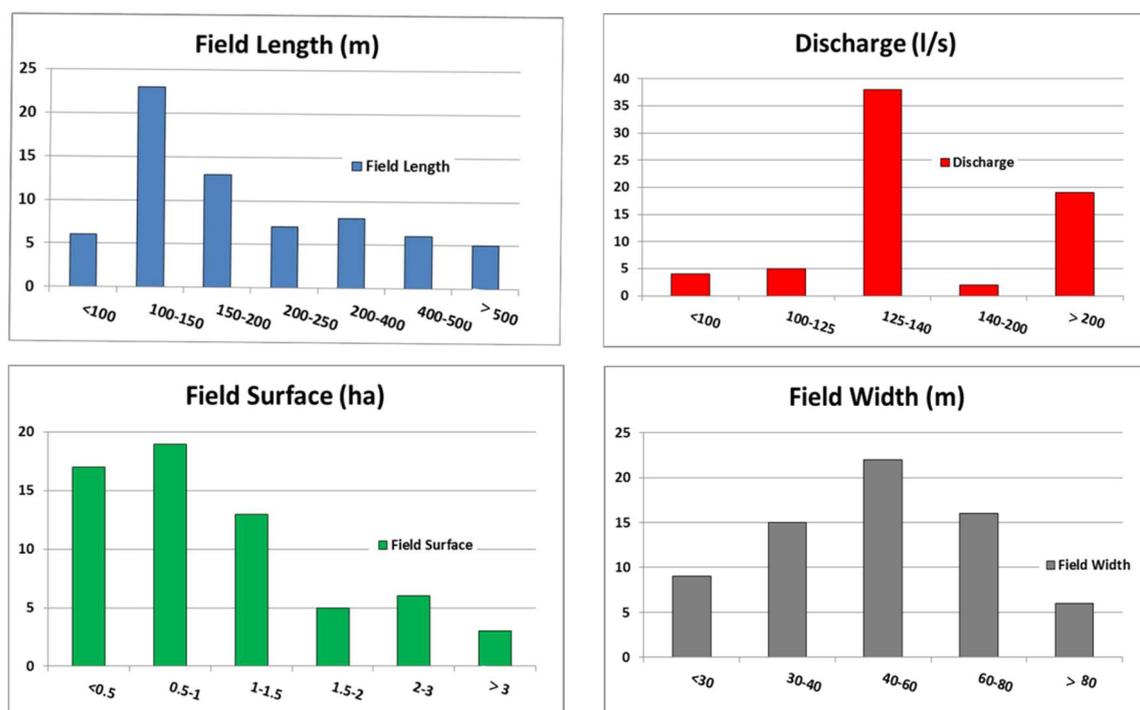


Figure 2-9 : Répartition des caractéristiques des parcelles et des débits d'irrigation obtenues à partir des enquêtes chez les exploitants de foin de Crau : (a) la longueur de la parcelle, (b) le débit théorique alloué par l'ASA, (c) la surface parcellaire et (d) la largeur de la parcelle.

Les enquêtes ont été réalisées à l'aide d'un entretien direct avec les producteurs de foin (voir annexe 4) en incluant les éléments suivant ;

- présentation générale de l'exploitation,
- conception des parcelles et itinéraire technique des opérations agricoles incluant l'irrigation, les coupes de foin et la fertilisation,

- gestion des pratiques d'irrigation de l'échelle parcellaire à l'échelle de l'exploitation ; le droit d'eau (donné par les ASA) et la fréquence de tour d'eau, le débit alloué (débit théorique), le mode de submersion et la durée théorique nécessaire pour irriguer chaque parcelle. Les doses d'irrigation théoriques injectées à la parcelle ont été calculées en multipliant la durée théorique fournie par les agriculteurs par le débit théorique alloué par l'ASA.

La bonne diversité des parcelles enquêtées est présentée dans la Figure 2-9 ; par exemple les longueurs et débits d'irrigation des parcelles sont compris entre 62-730 m et entre 110-350 l.s⁻¹ respectivement.

La qualité des relations obtenues a été évaluée dans une première étape en comparant les variables calculées T_i et D_i aux mesures effectuées dans les expérimentations de suivi présentés dans la sous-section 2.2.2. Dans une deuxième étape, les relations ont été appliquées sur des blocs de parcelles dont la structure a évolué au cours du temps. Ces blocs sont présentés dans le Tableau 2.4.

	Année	Surface de Bloc (ha)	Nombre d'irrigation
	1990		94
Bloc A	2006	30,2	17
	2012		10
Bloc B	2003	15.3	8
	2014		4

Tableau 2.4 : Caractéristiques des blocs de parcelles étudiés et de leurs évolutions au cours du temps.

2.4 Outils numériques utilisés avec le modèles Calhy : analyse de sensibilité par la méthode FAST et méthode inverse du SIMPLEX

Dans un premier temps, je présente la méthodologie utilisée pour réaliser l'analyse de sensibilité du modèle Calhy. Cette analyse a été conduite afin :

- de caractériser la sensibilité des différentes variables de sortie du modèle à la valeur des différents paramètres d'entrée : ces variables peuvent être des sorties directes du modèle ou des sorties plus opérationnelles calculées à partir des sorties directes du modèle,
- d'identifier pour les différentes variables de sortie l'influence de chacun des paramètres et de leurs interactions;
- d'identifier les paramètres qui ont le plus d'influence sur les différentes variables de sortie, et ceux qui ont le moins d'influence.

Cela peut s'effectuer à l'aide d'une analyse de sensibilité en déterminant la variation principale ou totale d'une variable de sortie d'un modèle, causée par les variations des différents paramètres d'entrée. Cette méthode repose sur l'exécution d'un ensemble de simulations en utilisant différents jeux de paramètres en entrée du modèle dont les valeurs sont tirées dans des distributions statistiques et sur l'établissant des relations entre les variabilités des entrées et des sorties.

A partir de là on peut séparer les paramètres en deux groupes (Buis et al., 2011) : i) ceux qui ont peu d'influence sur les variables de sortie, et qui peuvent donc être fixés à une valeur approchées et ii) ceux qui ont une forte influence et doivent être mesurés ou estimés le plus précisément possible.

La méthodologie repose sur la méthode Extended FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test, (Cukier et al., 1975, 1973; Saltelli et Bolado, 1998)).

Dans un deuxième temps, je présente la méthode qui a été utilisée pour estimer par inversion les paramètres les plus importants (ceux qui ont le plus d'influence tels qu'ils ont été identifiés par l'analyse de sensibilité) du modèle CALHY. Cette méthode fait appel à l'algorithme du SIMPLEX (Nelder et Mead, 1965).

2.4.1 Analyse de sensibilité du modèle Calhy par la méthode FAST

2.4.1.1 La décomposition de la variance et la méthode Extended FAST

La méthode EFAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test, (Cukier et al., 1975, 1973; Saltelli et Bolado, 1998)) fournit une analyse de sensibilité globale. Pour chaque variable de sortie étudiée, elle estime des indices de sensibilité (indices de *Sobol* (Sobol, 2001)) qui représentent les fractions de la variance totale de la variable de sortie qui sont expliquées par les variances des différents paramètres d'entrées.

En général, la décomposition de la variance totale d'une variable de sortie d'un modèle simulée à partir de n paramètres (X_1, \dots, X_n) peut s'écrire :

$$D = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,n} \quad (24)$$

où D la variance totale, D_i la partie de variance causée par le seul paramètre X_i , D_{ij} la partie de la variance expliquée par l'interaction entre les paramètres X_i et X_j , D_{ijn} la partie de la variance expliquée par l'interaction entre les paramètres X_i, X_j, X_n, \dots

À partir de là, les indices de sensibilité (indices de *Sobol*) se classent comme suit :

1- l'indice principal S_i qui représente la sensibilité de premier ordre du paramètre X_i , peut être calculé par :

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (25)$$

pour $1 \leq i \leq n$,

2- l'effet de l'interaction entre deux paramètres X_i et X_j (ou plus). Ici S_{ij} présente la part de variance dans la sortie du modèle causée par les variations des paramètres X_i et X_j et qui ne peut pas être expliquée par la somme de leurs effets propres. Cet indice de sensibilité est du second ordre et ainsi de suite jusqu'à l'ordre n sachant que la somme de tous les indices et pour tous les ordres est égal à 1,

3- l'indice de sensibilité total ST_i qui représente la part de variance dans une ou plusieurs variables de sortie expliquée par le paramètre X_i et ses interactions avec les autres paramètres, peut être calculée par la méthode EFAST :

$$ST_i = 1 - \frac{D_{\sim i}}{D} \quad (26)$$

où $D_{\sim i}$ la somme de tous les termes de variance qui n'incluent pas le paramètre X_i .

La méthode EFAST se base sur la transformation de la variance d'un paramètre de multidimensionnel en monodimensionnel en utilisation la fonction suivante :

$$X_i = G_i(\sin(\omega_i s)) \quad (27)$$

où s est un scalaire variant entre (0 et 2π), ω_i est la fréquence liée à chaque paramètre et G_i est une fonction de transformation. Des variations périodiques des valeurs de paramètres peuvent être générées avec cette fonction. Les oscillations résultantes des variables de sortie, qui correspondent aux différentes fréquences de chaque paramètre, permettent de calculer les indices de *Sobol* et d'identifier l'importance de chaque paramètre étudié.

Quatre étapes sont incluses dans la méthode EFAST pour réaliser l'analyse de sensibilité d'un modèle :

- 1- identification des lois de distributions des paramètres étudiés et des bornes limites,
- 2- génération du plan d'expérience EFAST en fonction de ces distributions. Echantillonner des valeurs des différents paramètres. Les valeurs doivent être comprises dans les bornes proposées.
- 3- simuler les sorties du modèle en utilisant les valeurs des paramètres issus des tirages précédents,
- 4- quantification statistique des variances des variables de sortie correspondant à l'ensemble des tirages des paramètres.

L'analyse de sensibilité est répétée N fois en changeant les valeurs de départ pour chaque paramètre. Les indices de sensibilité finaux sont les moyennes des répétitions.

2.4.1.2 L'application de l'analyse de sensibilité au modèle Calhy,

La méthode d'analyse de sensibilité EFAST utilisée dans ce travail est implantée sur Matlab et incluse dans la bibliothèque SensiLib développée au sein de l'UMR EMMAH (Buis et al., 2011).

Les variables étudiées sont les suivantes :

- H_{max} (mm) correspondant à la hauteur maximale de la lame d'eau à une abscisse donnée dans la parcelle,
- T_{arrive} (h) qui est le temps d'arrivée du front de ruissellement à une abscisse donnée dans la parcelle,
- $T_{submersion}$ (h) est la durée de submersion par la lame d'eau à une position donnée dans la parcelle,
- H_{integ} (mm h) représente l'intégrale durant toute la durée de submersion de la hauteur de la lame d'eau :

$$H_{integ} = \int_{t=T_{arrive}}^{t=T_{arrive}+T_{submersion}} H(t)dt \quad (28)$$

où $H(t)$ est la hauteur de la lame d'eau à un instant donné. Cette variable représente de façon intégrée la quantité d'eau qui a recouvert la parcelle à un endroit donné pendant toute la durée de l'irrigation. Elle augmente avec l'épaisseur de la lame d'eau (donc avec le débit ou avec la rugosité hydraulique) et avec la durée d'irrigation.

Avec la méthode FAST on a étudié la sensibilité de ces quatre *proxys* variables aux paramètres de Calhy étudiés : K_s , $\Delta\theta$, H_0 , k , Z , P_{ini} . Les valeurs limites des paramètres entre lesquels les valeurs seront échantillonnées pour réaliser les différents tirages sont données dans le Tableau 2.5. Nous avons réalisé 1473 tirages aléatoires et avons répété ceci 5 fois, soit un total de 5155 tirages et donc 5155 simulations du modèle Calhy.

Les simulations ont été réalisées en considérant une irrigation virtuelle sur une parcelle fictive dont les caractéristiques sont proches de la parcelle 1J du domaine du Merle, celle-ci étant par ailleurs représentative des irrigations et parcelles que l'on peut rencontrer en Crau. Les caractéristiques de cette irrigation et de cette parcelle virtuelle sont données dans le Tableau 2.6.

Pour chaque variable étudiée, les indices principaux et totaux ont été calculés pour chaque paramètre et à chaque pas d'abscisse de la parcelle de l'amont vers l'aval.

	Déficit d'humidité $\Delta\theta$ ($m^3 m^{-3}$)	Épaisseur de sol Z (mm)	Potentiel de succion P_{ini} (m)	Conductivité hydraulique à saturation $\log(K_s)$ ($m s^{-1}$)	Coefficient de Strickler k ($m^{1/3} s^{-1}$)	Détention superficielle H_0 (mm)
Min	0.06	200	3	-7	1.5	0
Max	0.12	600	7	-5.8	4	40

Tableau 2.5, les valeurs limites pour chacun des paramètres de Calhy.

Longueur L (m)	Largeur I (m)	Pente I ($m m^{-1}$)	Débit d'injection Q_i ($l s^{-1}$)	Flux d'infiltration initial f_{ini} ($mm h^{-1}$)	Durée d'irrigation T_i (h)	Durée de simulation T_s (h)	Discretisation spatiale du modèle r (m)	Discretisation temporelle du modèle p (s)
410	49	0.0028	150	0.001	7	18	6.6	60

Tableau 2.6, les valeurs fixes données aux paramètres de Calhy afin de lancer l'analyse de sensibilité effectuée avec la méthode FAST.

2.4.2 La méthode SIMPLEX (multi-start bound-constrained simplex) et l'inversion du modèle Calhy

Inverser un modèle (ou utiliser un modèle en mode inverse ou avec une technique d'inversion) consiste à retrouver les valeurs inconnues des paramètres du modèle en cherchant à reconstituer par simulation des données mesurées sur le terrain. Les simulations se font de façon répétée, en modifiant à chaque fois la valeur du paramètre recherché et en recherchant à réduire l'écart entre les simulations et les observations. C'est donc un processus itératif, qui requiert de nombreuses simulations et dont on cherche la convergence, c'est-à-dire une valeur de paramètre optimale et unique qui reconstitue au mieux les données mesurées. Cette reconstitution « au mieux » se base sur un critère qui représente l'écart entre les valeurs simulées et les valeurs observées, la convergence étant atteinte lorsque la valeur de ce critère est stable et minimale : la valeur finale de ce critère est un indicateur de la qualité du modèle utilisé.

Différentes méthodes d'inversion existent dans la littérature. On peut citer la méthode du simplex (Nelder et Mead, 1965), la méthode GLUE (Beven et Binley, 1992; Makowski et al.,

2002), la méthode des gradients (Marquardt, 1963) et les méthodes variationnelles (Bouttier et Courtier, 2002).

L'algorithme utilisé dans ce travail pour inverser le modèle Calhy est un « multi-start bound-constrained simplex ». Il fait partie de la bibliothèque OptiLib dans le package OptimISTICS développé à EMMAH par Buis et al. (2011). Il est basé sur la méthode du *Simplex* (Nelder et Mead, 1965) qui est par construction une méthode robuste de minimisation d'une fonction coût, c'est-à-dire qu'elle converge plus sûrement vers la vraie solution que d'autres méthodes. Par exemple, les méthodes de gradient classique ont plus de risques de converger vers des minima locaux qui représentent des solutions non-optimales. De manière à améliorer encore la convergence, l'algorithme utilisé analyse les résultats de plusieurs minimisations parallèles (« multi-start method »). L'algorithme permet aussi de contraindre les valeurs des paramètres du modèle à retrouver entre des bornes qui sont fixées par l'utilisateur (« bound-constrained method »). Cela permet d'éviter que ces paramètres prennent des valeurs physiquement irréalistes ou non représentatives des conditions étudiées.

2.4.2.1 Présentation de la méthode Simplex

La méthode d'inversion de Calhy est basée globalement sur l'ajustement de variables de sortie du modèle à un ensemble de variables observées en minimisant une fonction coût représentant la fonction objectif.

La fonction objectif adoptée dans notre travail est la fonction des moindres carrés pondérés par la variance d'erreur des données observées :

$$f_{obj} = \sum_{j,k} \left[\frac{O_{j,k} - S_{j,k}(\theta)}{\sigma_j} \right]^2 \quad (29)$$

où j est le numéro de la variable observée, k le numéro de la date d'observation, $O_{j,k}$ est l'observation de la variable j à la date k , $S_{j,k}(\theta)$ est la variable de sortie j à la date k simulée avec le modèle à partir du vecteur de paramètres θ et σ_j^2 est la variance d'erreur de la variable observée j . Ces variances d'erreur des observations ainsi que les bornes des paramètres doivent être précisées.

Lors de la première itération, la valeur initiale de chacun des paramètres à ajuster est tirée de façon aléatoire entre des valeurs limites : ceci constitue la première estimation des valeurs du jeu de paramètres à déterminer. Une simulation est réalisée avec ce jeu de paramètres, et le

critère d'erreur (fonction objectif) est calculé. Un nouveau tirage de valeurs de paramètres est alors réalisé qui permet de réaliser une nouvelle simulation et de calculer un nouveau critère d'erreur. La valeur de la fonction objectif pour le nouveau jeu de paramètres est comparée à celle du précédent et si elle est inférieure à cette dernière, la méthode Simplex va retenir le nouveau jeu de paramètres comme meilleure estimation, sinon il garde l'ancien jeu de paramètres. La méthode est répétée jusqu'à ce que la valeur de la fonction objectif se stabilise, selon un critère d'arrêt spécifié basé sur une évolution relative de la fonction objectif entre deux itérations successives.

L'algorithme d'inversion avec la méthode SIMPLEX s'arrête lorsque l'un des deux critères suivant est atteint :

- le système arrive à son nombre maximum d'itérations.
- la fonction objectif reste stable autour d'une valeur minimale.

Dans ces deux cas, on parlera de convergence de la méthode.

Ces processus sont répétés N fois et les paramètres estimés finaux sont ceux pour lesquels la valeur de la fonction objectif est minimale sur l'ensemble des N répétitions.

Les sorties de l'algorithme qui sont obtenues après la convergence du système sont les suivantes :

- valeurs finales des paramètres,
- valeur finale de la fonction objectif,
- pour chaque paramètre, variances d'estimation et moyenne des valeurs estimées avec toutes les répétitions,
- corrélation entre paramètres,
- données sur l'historique d'évolution des itérations pour chaque répétition. Ces données sont ordonnées en fonction des valeurs croissantes de la fonction objectif finale de chaque répétition. Ces données contiennent pour chacune des répétitions :
 - la matrice des valeurs des paramètres estimés à chaque itération.
 - la valeur de la fonction objectif.

2.4.2.2 Application de la méthode du SIMPLEX

La méthode d'inversion Simplex est insérée comme une méthode d'optimisation dans le package OptimisTICS (Buis et al., 2011) développé au sein de l'UMR EMMAH. OptimisTICS est une bibliothèque de codes informatiques implantée dans Matlab. Elle assure l'automatisation de la répétition du processus de minimisation de la fonction objectif en

généralisant différentes valeurs de départ des paramètres distribuées aléatoirement sur tout l'espace d'échantillonnage.

A la convergence du système, le logiciel OptimisTICS génère des courbes représentant l'évolution de l'estimation de chaque paramètre à chaque itération afin d'analyser la performance du processus.

La méthode d'inversion utilisée ici sert à estimer des paramètres de Calhy qui sont difficiles à mesurer ou expertiser à partir de données caractérisant la performance du ruissellement. Pour exécuter l'algorithme de cette méthode, deux types d'information sont nécessaires :

1- les arguments suivants qui doivent être fournis pour assurer le démarrage du processus itératif :

- les variances d'erreur des variables observées σ_j^2 : elles ont été déterminées à partir de la variabilité expérimentale observée lors des suivis d'irrigation; elles sont données dans le Tableau 2.7. Ces variances servent à adimensionner les variables dans le calcul de la fonction objectif ; cela permet d'uniformiser, et de contrôler, le poids de chaque variable dans le processus de minimisation ;
- les valeurs limites des paramètres d'intérêt (minima et maxima) ; dans notre cas ce sont quasiment les mêmes que celles utilisées dans l'analyse de sensibilité (voir Tableau 2.5).
- le nombre de répétition N que nous avons fixé à 20.
- le nombre maximal d'itérations pour chaque répétition, fixé à 300 ;
- le nombre maximal d'évaluations de la fonction objectif pour chaque itération, fixé à 1000.
- la valeur du critère d'arrêt, fixé à 0.01 %.

2- les données parcellaires incluant la structure des variables observées pour chaque irrigation, et les paramètres mesurés (longueur, largeur, pente, débit d'irrigation, ..) qui sont nécessaires au fonctionnement du modèle Calhy et qui diffèrent d'une parcelle à l'autre.

Variables		$H_{max} (mm)$	$T_{arriv} (hr)$	$T_{submer} (hr)$	$H_{integ} (mm hr)$
σ_j^2	Amont	0.125	0.125	0.121	81
	aval	0.25	0.0125	0.25	36

Tableau 2.7, les valeurs des variances d'erreur utilisées pour chaque variable afin de calculer la fonction objectif.

2.4.2.3 *Diagnostics d'erreur*

Pour évaluer les résultats du processus d'estimation des paramètres, plusieurs types d'informations (calculées par la procédure de minimisation SIMPLEX ou calculées a posteriori) ont été utilisés. Ces informations reposent sur la quantification de l'écart entre les données mesurées et celles estimées ou simulées. Il s'agit de :

- a) la variance des paramètres estimés ; fournie par la méthode SIMPLEX
- b) le RMSE (Root Mean Square Error) calculé entre les données des variables observées *Obs* et simulées *Sim* pour chacun portant sur l'évolution de la lame d'eau au cours du temps dans les positions amont et aval sur chaque parcelle comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Sim_i - Obs_i)^2} \quad (30)$$

où *i* est le numéro de l'observation et *N* est l'ensemble des observations pour chaque variable de sortie.

- c) le critère de Nash-Sutcliffe qui a aussi été utilisé pour évaluer la reconstitution des données observées par les simulations avec les valeurs finales des paramètres ajustées à la convergence du système d'inversion

$$C_{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Sim_i - Obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_o - Obs_i)^2} \quad (31)$$

où \bar{X}_o est la moyenne des observations.

3 Partie 3 : Résultats et Discussions

Dans cette partie, nous allons exposer quatre chapitres décrivant les principaux résultats obtenus dans ce travail.

Le premier chapitre est dédié à la caractérisation numérique du modèle physique d'irrigation utilisé dans ce travail. Cette caractérisation se fait en utilisant d'une méthode d'analyse de sensibilité visant dans un premier temps à classer les paramètres du modèle selon leur influence sur les variables opérationnelles de sortie du modèle qui nous intéressent, telles que la quantité d'eau infiltrée ou la quantité d'eau qui circule à la surface de la parcelle. Ceci nous permet d'identifier les paramètres qui doivent être connus avec une haute précision pour calculer le bilan hydrique de l'irrigation avec une faible incertitude. Dans un second temps, nous appliquons cette méthode d'analyse de sensibilité afin d'identifier la sensibilité aux paramètres des variables intermédiaires du modèle, appelées « proxy-variables », qui seraient plus facilement mesurables sur le terrain à l'aide d'un dispositif expérimental simple. À la fin de ce chapitre on va proposer une méthode d'estimation des paramètres basée sur une méthode inverse et un dispositif expérimental simple à déployer sur le terrain.

La validation de cette approche d'estimation des paramètres importants est présentée dans le deuxième chapitre. Ceci a été effectué en utilisant des variables alternatives mesurables « proxy variables » et en utilisant notre modèle en mode inverse à l'aide d'un algorithme d'inversion de type SIMPLEX.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de l'analyse sur modèle du fonctionnement de l'irrigation gravitaire d'une parcelle agricole, en particulier nous montrons qu'il est possible de définir un critère d'arrêt qui minimise les pertes d'eau par colature à partir des paramètres de la parcelle et du débit injecté. Dans ce chapitre, nous présentons également des premiers résultats sur des scénarios d'optimisation de l'irrigation à l'échelle de la parcelle.

Enfin, l'élaboration de différents modèles empiriques permettant de calculer la dose et la durée de l'irrigation à partir des enquêtes et des expérimentations menées chez les exploitants agricoles de prairies de foin de Crau est présentée au dernier chapitre de cette partie. Nous évaluons également la capacité de ces modèles empiriques à bien représenter les évolutions des doses d'irrigation apportées au fur et à mesure des reconfigurations parcellaires chez deux exploitants.

3.1 Chapitre 1 : Caractérisation du modèle CALHY ;

“Global sensitivity analysis for identification the key estimation of Calhy’s parameters using accessible operational outputs”

Les modèles d’irrigation gravitaire (Calhy dans notre cas) apportent des connaissances sur les dynamiques de flux d’eau à la surface de la parcelle (propagation) et dans le profil du sol. Ces processus font intervenir des paramètres reliés à la modélisation des différents processus en jeu et dont la détermination directe à l’échelle de la parcelle agricole peut être difficile. Dans le modèle CALHY, cinq paramètres sont difficiles à mesurer. Il s’agit :

- du déficit de teneur en eau : $\Delta\theta$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$),
- du potentiel de succion au front d’infiltration : P_{ini} (m),
- de la profondeur de sol Z (m),
- de la conductivité hydraulique à saturation K_s (m s^{-1}),
- du coefficient de frottement hydraulique de Manning Strickler k ($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$),
- de la capacité de rétention superficielle H_0 (m).

Lorsque la détermination directe des paramètres est difficile, l’utilisation de méthodes inverses est possible. Dans le cas de modèles complexes comme le modèle CALHY, ces méthodes consistent à estimer de façon automatique et itérative le jeu de paramètres qui reconstitue au mieux un ensemble de variables mesurées sur le terrain. Si le modèle doit être spatialisé sur de nombreuses parcelles, alors les variables doivent pouvoir être mesurées de façon aisée sur le terrain. Enfin, la valeur des variables mesurées doit être influencée par la valeur des paramètres : la sensibilité des variables aux paramètres doit être suffisante.

La priorité de détermination de ces paramètres, et la précision avec laquelle ces paramètres doivent être déterminés, peut être identifiée selon leur influence sur les variables de sortie du modèle utilisées dans notre problématique, à savoir les différents termes du bilan hydrique d’une irrigation (quantité d’eau apportée sur la parcelle, infiltrée, drainée et perdue en colature par ruissellement).

Dans les deux cas précédents, les méthodes d’analyse de sensibilité permettent de répondre aux questions posées. Les résultats obtenus en utilisant la méthode d’analyse de sensibilité globale E-FAST (Cukier et al., 1975, 1973; Saltelli et Bolado, 1998) sont présentés dans ce

chapitre sous la forme d'un projet d'article. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- I. quatre paramètres ont des influences importantes sur les volumes d'eau qui submergent la surface de la parcelle : deux paramètres ont un influence sur H_{mean} en amont (k et H_0) et deux autres sur $F_{infiltr}$ en aval (Ks et $\Delta\theta$),
- II. deux paramètres ont des influences sur les volumes d'eau infiltré : Ks et $\Delta\theta$,
- III. un dispositif de mesure simple basé sur le suivi de la dynamique de la lame d'eau dans les parties amont et aval de la parcelle permet de définir plusieurs variables élaborées appelées « proxy-variables » qui présentent des sensibilités différentes selon les paramètres : un tel dispositif de mesure doit permettre d'estimer les paramètres précédents en inversant le modèle CALHY à l'aide d'un algorithme d'inversion (SIMPLEX).

Global sensitivity analysis of a surface irrigation model in order to estimate key parameters from accessible operational outputs

Mohamed ALKASSEM ALOSMAN, Samuel BUIS, Stéphane RUY and Albert OLIOSO

1. Introduction

Water management systems are needed in irrigated agrosystems in order to save water and to maintain a high level of crop production. At the plot and farm scales, irrigation models are very useful to predict the water balance and to optimize irrigation practices; they are widely used in hydro-system work and eco-system management.

The modeling of surface irrigation system has been developed in the two last decades of the last century due to the good understanding of its physical and mathematical principles (Katopodes et al., 1990). In these systems the water submerges the plot, following the slope and under the effect of the gravity; from the inlet of layout (plot or furrow) toward the outlet. Surface irrigation models predict the behavior of these systems through the numerical resolution of the physically based equations describing the two main processes involved in surface irrigation, namely runoff propagation at the soil surface and water infiltration into the soil. These equations involves physical parameters that must be accurately known at the field scale (Clemmens, 2009; Gillies and Smith, 2015; Katopodes et al., 1990; Strelkoff and Clemmens, 2007).

In surface irrigation model, the different processes are governed by coupling surface flow model with water infiltration model through the soil surface. The necessary parameters for these models can be classified into three groups; 1) geometrical parameters such as dimensions of plot, slope ...etc. 2) operational parameters which describe the hydraulic friction, the infiltration and soil humidity, the vegetation development, 3) parameters related to irrigation management such as inflow rate and irrigation duration (Katopodes et al., 1990).

Among these parameters, some parameters are non-measurable and difficult to know. It is therefore important to define which ones need to be determined; those who have a significant impact on the outputs of interest of the model should be determined with a high accuracy whereas those who have a slight impact can be fixed at a nominal value (Buis et al., 2011; Iooss and Lemaître, 2015; Song et al., 2015; Varella et al., 2010).

The parameters of the first and third groups can be easily determined from the irrigation system design. The second group of parameters has an important influence on the design and management of a surface irrigation system (Ebrahimian et al., 2010; Gillies et al., 2006; Katopodes et al., 1990; Mailapalli et al., 2008; Robertson et al., 2004; Walker, 2005; Weibo et al., 2012). However it is difficult to measure them directly due to their spatial variability, to the time or cost needed for their determination. Several studies show that they may be estimated indirectly through an inverse modeling approach using a physically based model of surface irrigation providing outputs of interest that can be monitored in situ (Timlin et al., 2001; Varella et al., 2010). This approach has been widely used by several authors. (Elliott and Walker, 1982) estimated infiltration parameters from the water advance curve measured at two points of the soil surface, in the mid and last points of the plot or furrow. By fixing one parameter to a prescribed value, (Ebrahimian et al., 2010; Mailapalli et al., 2008; Shepard et al., 1993) reduced the number of infiltration parameters so that the number of point to be monitored was reduced to one point. That could lead to error in estimation as mentioned in (Weibo et al., 2012). (Benham et al., 2000) assessed the quality of estimation of final infiltration rate in surge irrigation by using fitted infiltration parameters of two models; Kostiakov; 1932 and modified Kostiakov(Smith, 1972). These parameters were estimated based on two types of observations: the input and output discharge hydrograph in the one hand, and the advance curve data during an irrigation event on the other hand. They showed that the better accuracy for the estimation of the final infiltration rate was obtained when

observed input and output discharge hydrographs were used for fitting the parameters of infiltration. For furrow irrigation, (Walker, 2005) proposed a multilevel calibration technique in order to estimate the Manning roughness parameter and the infiltration parameters in a modified Kostiakov model by using observed data of inflow and outflow hydrograph and advanced and recession runoff curve to. (Wang et al., 2007) proposed a method for estimating the soil infiltration parameters of border irrigation based on the time monitoring of water depth at several locations along the field. All these methods required sufficient data which are not always available according to (Ebrahimian et al., 2010). (Bader et al., 2010) used observations composed of the water advance curve all along the field, and the runoff discharge at the inlet and at outlet of the field to estimate a group of irrigation parameters including the saturated hydraulic conductivity, the soil surface water storage capacity, the Manning Strickler roughness coefficient and the depression storage in soil surface. For border irrigation system, (Weibo et al., 2012) estimated the infiltration parameters and the Manning roughness coefficient from measurements of the water advance curve. They checked the coherence of fitted parameters by comparing simulated and observed subsurface water storage.

The difficulties and errors encountered in parameters estimation in the above presented methods may be due to (i) the lack of accurate value of some parameters such as Manning coefficient as in (Ebrahimian et al., 2010; Elliott and Walker, 1982; Mailapalli et al., 2008; Shepard et al., 1993) or to (ii) the difficulty of monitoring some variables needed for the estimation process like variations in time and space of water height, outflow hydrograph and surface water volume (Bautista et al., 2009a; Weibo et al., 2012). Moreover, the unicity of fitted parameters is not always ensured as noticed by (Bautista et al., 2009a, 2009b). According to (Varella et al., 2010) this could be related to the lack of knowledge of the

sensitivity of the variables used in calibration and validation processes to the estimated parameters.

Sensitivity of model variables to the variation of model parameters can be provided through global sensitivity analysis, GSA, (Varella et al., 2012). This kind of analysis aims to quantify the apportioned influence of each model input to the resulted uncertainty on model outputs (Buis et al., 2011; Cibin et al., 2010; Foglia et al., 2009; Iooss and Lemaître, 2015; Saltelli et al., 2000a). Through providing qualitative and quantitative indices, the GSA allows classifying the importance of each parameter in order (i) to reduce the number of parameters that have to be fitted and (ii) to identify the most sensitive variables for each parameter (Mishra, 2009; Song et al., 2015; Varella et al., 2012). GSA may also be used in order to quantify and to separate the direct influence and the cross influence (interactions) of parameters on variables (Saltelli et al., 2000b; Song et al., 2015; Varella et al., 2012). Thus, it is important to perform a **GSA** and parameter identification before their calibration or estimation (Cibin et al., 2010; Song et al., 2015). Moreover, the assessment of the sensitivity analysis could improve the conditions of parameters estimation (Varella et al., 2012) and can lower the estimation uncertainty of each parameter (Mishra, 2009).

The goals of this paper are twofold. Firstly, we perform a global sensitivity analysis of three outputs of interest of a flooding irrigation model to its parameters related to infiltration and hydraulic roughness functions, in order rank the parameters according to their impact on the efficiency of the irrigation system. Investigated model outputs are related to the water balance of an irrigation event and to its field homogeneity. Secondly, we derive “proxy-outputs” from the previous outputs of interest that would be easier to monitor in the field during irrigations events. Using simulated data obtained with a surface irrigation model, we then perform the GSA using these outputs in order to design a simple and efficient monitoring system that could be used for the estimation of key soil and hydraulic parameters.

2. METHODS

2.1. Calhy model

The Calhy model (Bader et al., 2010) is a one-dimensional flooding irrigation model. It provides a description of water infiltration into the soil profile and a description of water runoff over the during the three stages of the irrigation: advancement of the runoff front at the soil surface at the beginning of the irrigation, steady state of water propagation and recession after irrigation stops. Water runoff is modeled by the Manning equation under the kinetic wave approximation of the Saint Venant equation coupled with the Green and Ampt equation for infiltration. These equations are not provided in this paper. The model is discretized in time during the three stages of the irrigation and in space along the irrigated field and is solved with the algorithm provided in (Bader et al., 2010). The model operates at the field scale and calculates four main outputs which are computed at each space and time steps:

- Runoff flow per unit width Q_{rl} ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Water height H (m) over the plot surface
- Instantaneous infiltration flow f ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Cumulative infiltration F (m) at the end of irrigation.

2.2. Calhy's parameters, Outputs of interest and proxy Outputs

2.2.1. Parameters of model CALHY

12 parameters are contained in the equation structure of the Calhy model. They can be classify in two groups:

- I. Parameters that are accessible and easy to be measured in situ. These parameters are related to the field geometry (length, width and slope) and to irrigation management (inflow discharge and irrigation duration).

II. Parameters that are difficult to be measured directly at the field scale or representative of the field variability:

- One parameter is the soil depth Z (m),
- Two parameters are related to the initial soil moisture: the volumetric soil moisture θ_i (m^3m^{-3}), and the soil suction capillary potential of soil P_{ini} (m).
- Two parameters describe the state of the soil during irrigation: θ_s (m^3m^{-3}) is the soil water content at saturation and K_s ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) is the saturated hydraulic conductivity.
- Two hydraulic parameters explain soil surface state and vegetation cover: k ($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$): the hydraulic friction coefficient of Manning Strickler and H_0 (m) : the soil surface depression storage.

θ_s and θ_i are combined in a single parameter which is the soil moisture depletion calculated as the difference between soil moisture at saturation θ_s and initial soil moisture θ_i : $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$.

K_s , $\Delta\theta$ and P_{ini} are parameters of the Green & Ampt model

2.2.2. Outputs of interest

Three variables of interest related to the irrigation water balance and the irrigation field homogeneity can be computed from Calhy's outputs. These outputs of interest are:

- H_mean ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$): the mean of water height crossing the section at a distance x from the field inlet throughout the irrigation time,

$$H_{mean}(x, t) = \frac{\int_{\tau=0}^{\tau=t} H(x, \tau) d\tau}{t} \quad (32)$$

- $F_infiltr$ (m): the cumulative infiltration at each section of distance x from the field inlet and at the end of the irrigation,

$$F(x, t_{end}) = \int_{\tau=0}^{\tau=t_{end}} f(x, \tau) d\tau \quad (33)$$

- LF (m): the cumulative infiltration throughout the plot at the end of the irrigation.

$$LF = mean[F(x, t_{end})] \quad (34)$$

where t_{end} is the duration from the beginning of the irrigation to the disappearance of the water height at the surface of the plot.

2.2.3 Proxy outputs

Due to the difficulty in monitoring the output of interests, accessible outputs easier to measure in situ are proposed to conduct a robust estimation of Calhy's parameters through inverse approach of Calhy model. These "proxy outputs" are extracted only from water height evolution at two locations in the field, see Figure 1. The first location called the "upstream section" is located near the inlet of the field and the other one called the downstream section is located near the outlet of the field.

- H_{max} (mm) is the maximal value of the water height,
- T_{arrive} (h) is the arrival time of the runoff front,
- $T_{submersion}$ (h) is the duration of the submersion,
- $H_{integral}$ (mm.h) is defined as : $H_{integral} = \int_{t_{arrive}}^{t_{arrive}+t_{submersion}} H(t) dt$

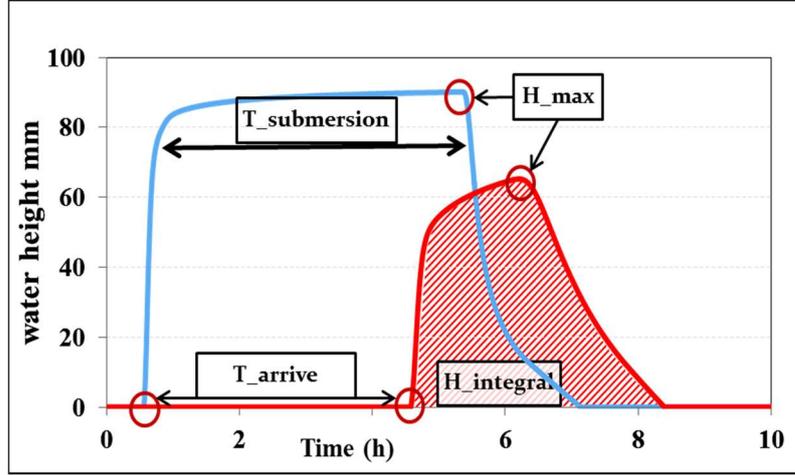


Figure (1): Time evolution of water height in two locations in a plot during a numerical irrigation event conducted with the Calhy model. The first blue curve is obtained in the upstream section and the second red curve is obtained in the downstream section. *Proxy* outputs are given on this figure.

2.3. Global sensitivity analysis

A Global sensitivity analysis is applied in our study in order to assess the variance in model's outputs related to the variation in model's inputs or parameters through decomposing this variance and by referring each part of the variance to the most sensitive parameters.

2.3.1 Sobol's indices and variance decomposition (Sobol, 2001)

The variance of an output which is caused from the variation of N parameters (x_1, \dots, x_n) can be decomposed as follow:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,n} \quad (35)$$

Where D is the total variance, D_i is the part of variance caused uniquely by the parameter X_i , D_{ij} the part of variance explained by the interaction between parameters X_i and X_j .

The Sobol's indices can be classified into:

1. The main or principal sensitivity index S_i that presents the part of output variance related to the variation in parameter X_i . It can be computed by;

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (36)$$

2. The sensitivity index of second order S_{ij} that present the part of variance explained by the effect of the interaction between two parameters. Sensitivity index of higher order are also computed, that represent the effect of the interaction between three or more parameters. Thus the sum of the principal and all other order sensitivity indices equal 1 and all parameters' indices are included in the range of [0; 1].
3. The total sensitivity index ST_i presents the effect principal of parameter X_i and its interaction with the other parameters to the variance on model's outputs. It is written as follows:

$$ST_i = 1 - \frac{D_{\sim i}}{D} \quad (37)$$

where $D_{\sim i}$ is the sum of all terms of variance explained by all orders indices of all parameters except X_i .

For a given output of interest y , the classification of importance of studied parameters is performed by studying indices S_i and ST_i ; parameters with a large value of S_i and/or ST_i have a large impact on the value of the output and therefore should be determined accurately. On the contrary, parameters with a low value of S_i and/or ST_i have a negligible impact on the value of the output and therefore don't need to be determined accurately.

The sensitivity of a given output of interest to all parameters is also estimated through the computation of its coefficient of variation CV . This coefficient is computed as follows for the output y :

$$CV(y) = \frac{\sigma(y)}{\bar{y}} \quad (38)$$

where $\sigma(y)$ is the standard deviation of the studied output y and \bar{y} is the mean of simulated y . A low value of $CV(y)$ means that output y is weakly influenced by any of the parameters, even if indices S_i and/or ST_i of any parameter are quite high. As a conclusion, a given parameter i will have a large impact of a given output y if sensitivity indices S_i and/or ST_i are high and if $CV(y)$ is high.

2.3.2 EFAST method: The Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (Cukier et al., 1975, 1973; Saltelli et al, 2000a and 2000b)

An accurate estimation of Sobol's indices usually requires several dozen thousands of model simulations. A fast method and an optimal simulation design are therefore needed to decrease the computation time cost. The EFAST method has been widely used for the estimation of Sobol's indices and is considered to be robust and efficient. We used the EFAST method described in (Saltelli et al, 2000ab) and implemented as a Matlab function (Buis et al, 2011).

The main steps of the method are:

- I. For each parameter, a large number of parameter values are sampled following the prescribed statistical distribution of the parameter,
- II. Outputs of interest are simulated by the model for every parameters' values.
- III. Statistic quantification of outputs' variances and Sobol indices are calculated.
- IV. Steps I to III are repeated 5 times.

At the end of the repetitions, mean Sobol's indices, and overall outputs variances and coefficient of variations are calculated.

The number of parameter values was set to 1500: we considered that this value was large enough for an accurate estimation of Sobol's indices and small enough to avoid large

computation time. Preliminary tests were conducted with this number set to 500 that show no significant differences on the Sobol's indices. The value of 1500 may be slightly modified by the EFAST method according to numerical constraints of the method.

2.3.3 Application of the method in our study

Table (1) show the studied Calhy's parameters and their ranges of variation from (Bader et al., 2010). These ranges of variation include typical value of soils properties, and irrigation system characteristics that can be found in the Crau region, southern of France. All simulations are performed on a virtual field with the following characteristics: length = 410 m, width = 49 m, slope = 2.8 m m⁻¹, injected irrigation flow = 150 l s⁻¹, irrigation duration = 7h, duration of the simulation = 20h.

Parameter	Definition	Range	Unit
$\Delta\theta$	Soil water depletion	0.06-0.14	(m ³ m ⁻³)
Z	Soil depth	0.200-0.600	(m)
P_{ini}	Suction capillary potential of soil water	3.9-7.6	(m)
K_s	Saturated hydraulic conductivity	3.0e ⁻⁷ -1.6e ⁻⁶	(m.s ⁻¹)
k	Hydraulic friction coefficient of Manning Strickler	2-5.5	(m ^{1/3} s ⁻¹)
H_0	Soil surface depressionnal storage	0-0.04	(m)

Table (1). The studied Calhy's parameters and their range of variation

We suppose that the variations of these parameters follow uniform distributions. The number of Calhy's simulation used by the EFAST method is of 51555 simulations corresponding to a sample size of 1473 different parameters' values for each parameter, the process being repeated 5 times.

3. Results and Discussion

a. Global sensitivity analysis of outputs of interest to parameters of CALHY model

Analysis of main Sobol's sensitivity indices

Figure (2) shows the main effect of each parameter to the variance of each output. The sum of all main sensitivity indices S_i is less than one due to the non-linearity of Calhy model and to interactions between parameters.

The main index of studied Calhy's parameters presented in Figure 2a shows that near 95% of the variance in H_mean output is caused by the main effects of parameters throughout all the plot length. A dominant effect to the variance of H_mean output in the upstream of plot is shared between the parameters k and H_0 with main index close to 50% for each one.

The effect of these two parameters decreases to 0% from the upstream part to the downstream part of the plot with an increasing effect of parameter Ks which ranges from ~0% in the upstream part to ~70% in the downstream part of the plot. Parameter P_{ini} has an effect close to 10% to H_mean 's variance for the last third of the plot length. The effects of parameters $\Delta\theta$ in H_mean variance ranges from 10-15% and starts in the second half of plot length. Parameter Z has no effect on the variance of this output.

In the upstream part of the plot, the mean of water height is determined only by soil surface parameters related to the runoff dynamic. In the downstream part of the plot, surface parameters have a lower impact and soil infiltration parameters have the biggest effect: this result suggests that in the downstream part of the plot, water flow at the soil surface is limited by the soil infiltration capacity. This result is in accordance with the results of (Clemmens, 2009) which summarizes that the depth of water runoff over the plot surface is depended upon

the infiltration and roughness condition and that water depth is reduced at high infiltration conditions and is increased at high roughness conditions. (Tiscareno-Lopez et al., 1993) obtained similar conclusions.

Fig 2b shows that the simulated variance of $F_{infiltration}$ output results mainly from variation in parameter K_s , P_{ini} and $\Delta\theta$. The sum of their main effects to $F_{infiltration}$'s variance reaches about 95% in the first three quarters of the plot length, their principals' effects are 70%, 10% and 15% respectively. This sum decreases to about 30% in the middle part of the plot and then increases in the last part of the plot up to 60%. The evolution along the field length of the sum of all main sensitivity indices follows a complex pattern that shows that interactions are negligible in the upstream part of the plot, then these interactions increase in middle of the plot and finally they decrease in the last part of the plot.

Only K_s and $\Delta\theta$ parameters have a significant effect on the variance of LF output with main sensitivity indices S_i of 75% and 13% respectively (see Fig 2c). No significant effects of parameters k , Z and H_0 are observed on the variance of $F_{infiltration}$ or LF outputs.

K_s is the main parameters that has an impact on the cumulative infiltration at a given location of the field and at the field scale. It has also a large impact on the water height at the soil surface H_{mean} during irrigation but only in the downstream part of the field, whereas it has no effect on the water height in the upstream part of the plot. As runoff propagates along the field, an increasing part of the inflow infiltrates into the soil: the remaining water flow available for runoff is less and less important. In the downstream part of the plot, the decrease in surface runoff flow due to infiltration, which depends mainly on the value of K_s , has a greater impact on H_{mean} than variations of others parameters, including the roughness coefficient k . In the upstream part of the plot, water flow available for runoff is not

significantly different from the injected irrigation flow whatever the value of K_s and the effect of other parameters on H_{mean} are maximised.

Last, soil depth parameter has no influence or a negligible influence on the studied outputs.

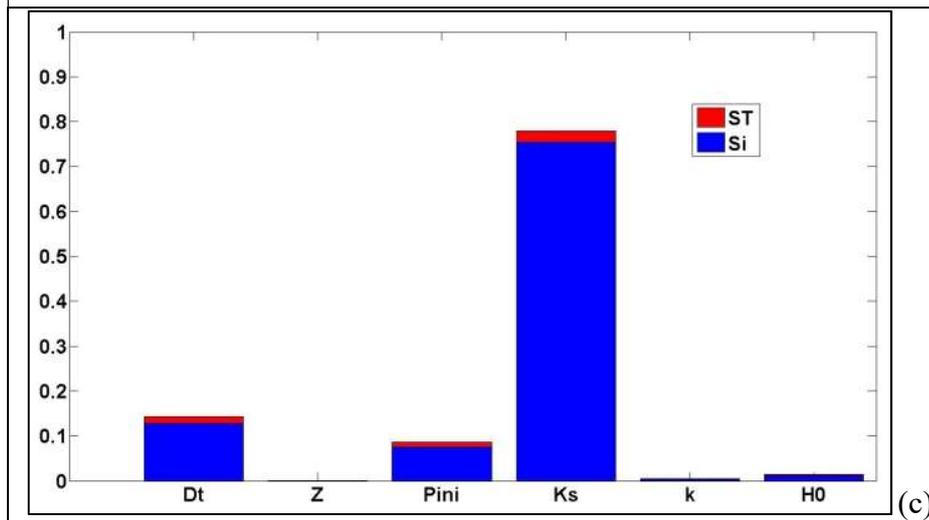
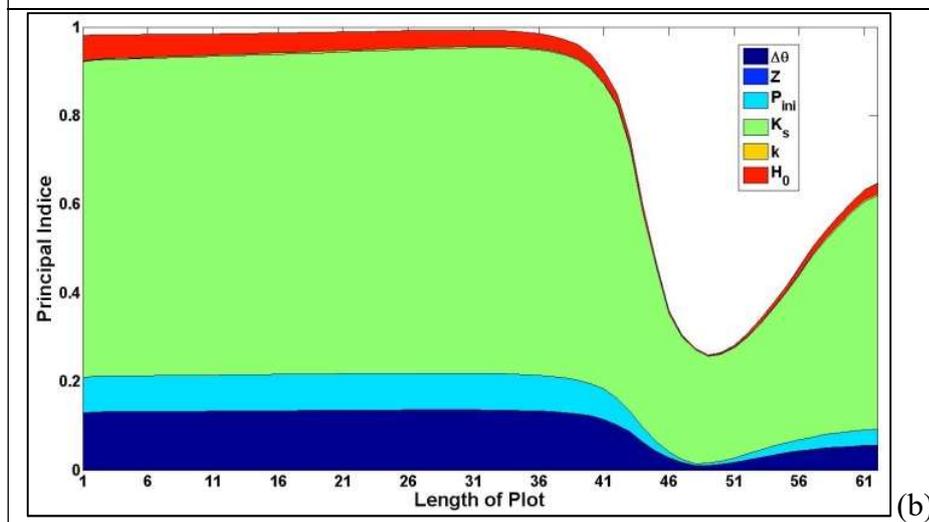
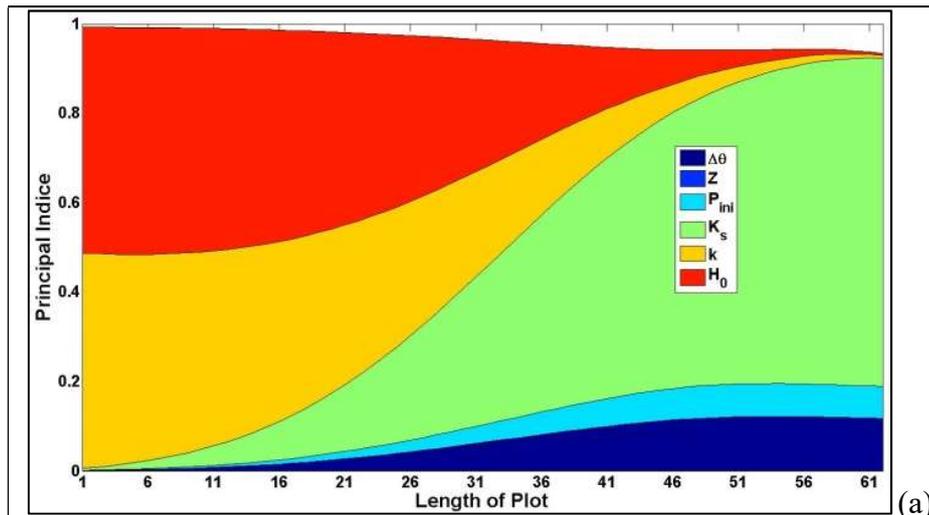


Figure (2). The main and total indices of the six Calhy's parameters to each output of interest. The number of the space step along the field is labelled on the x-axis for (a) and (b).

(a) corresponds to H_mean output;

(b) corresponds to $F_infiltr$ output,

(c) corresponds to LF output.

The white upper section in a and b and the red one in c represents the effect on output variance related to interactions between parameters.

Analysis of the coefficient of variations of the outputs

The coefficients of variation of each output due to parameters variations are analysed in relation with the total sensitivity index of each parameter. Results are presented in Figure (3). For each space step along the field, the coefficient of variation of a given output on the one hand and the total sensitivity index for each parameter on the other hand are computed. The coefficient of variation is on the x-axis of Fig (3) whereas the total sensitivity index is on the y-axis. Two dashed straight lines are also plotted. The horizontal dashed line corresponds to a value of the total sensitivity index of parameter i ST_i of 10 %, the vertical dashed line corresponds to a value of the coefficient of variation of 20 %. Following (Makowski et al., 2006; Varella et al., 2012), we considered that a ST_i less than 10% is not significant. For output y , we also considered that a $CV(y)$ under 20 % means that output y is not significantly influenced by any of the parameters. Points of the scatter plot located above these two limits represent a localisation in the field where output y is sensitive to parameter i . On the contrary, points of the scatter plot located below these two limits represent a localisation in the field where output y is not sensitive to parameter i .

$CV(H_mean)$ exceeds 20% throughout all the plot length and reached about 80% at the downstream part of the plot (Fig 3a), whereas $CV(F_infiltr)$ exceeds 20% only in the first half part, where values of $CV(F_infiltr)$ are less than 30 %, or in the last sixth part of the plot where $CV(F_infiltr)$ reaches its maximum value of 57 %. $CV(LF)$ is also less than 20 % (data not shown).

H_mean is the main sensitive studied output and its sensitivity, estimated through the value of $CV(H_mean)$, increases continuously from the upstream to the downstream part of the field. In the upstream part of the field, H_mean is sensitive mainly to soil surface parameters, namely the roughness coefficient k and the soil surface detention H_0 , whereas it is most

sensitive to parameter K_s in the downstream part of the plot, as already noticed in Fig (2a). Other parameters related to soil infiltration have also an impact on H_mean in the downstream part of the field: total sensitivity index of $\Delta\theta$ is about 14%, which is the second parameter of influence on H_mean in this location of the field, whereas total sensitivity index of P_{ini} is just less than 10%.

$CV(L_Infiltr)$ follows a complex pattern from the upstream part to the downstream part of the field, with a minimal value $< 20\%$ in the central part of the field. Variations of the values of $L_Infiltr$ are related first to variations of values of K_s , with a total sensitivity index ST_{K_s} ranging from 75% in the upstream part of the field to 85% in the downstream part of the field, then to variations of values of $\Delta\theta$, with $ST_{\Delta\theta}$ ranging from 13% (upstream) to 32% (downstream), and variations of values of P_{ini} and H_0 , with $ST_{P_{ini}}$ (respec. ST_{H_0}) ranging from 8% (respect. $\sim 5\%$) (upstream) to 23% (respect. 14%) (downstream). Whatever the location in the field and the value of $CV(L_Infiltr)$, we always have $ST_{K_s} > ST_{\Delta\theta} > ST_{P_{ini}} > ST_{H_0}$. These results are similar to the ones of (Bader et al., 2010; Moore et al., 1980; Risse et al., 1994; Skaggs and Khaleel, 1982) who indicated that the infiltration amount is less sensitive to parameter P_{ini} and more sensitive to K_s and $\Delta\theta$.

In the perspective of estimating the water balance or the homogeneity of infiltration during a surface irrigation event, an accurate knowledge of parameters K_s , H_0 and $\Delta\theta$ is needed, whereas a rough estimation of the value parameter P_{ini} may be enough. When dealing with the water height at the soil surface, K_s , k and H_0 should also be known precisely. From overall, parameters K_s , $\Delta\theta$, k and H_0 are considered as important parameters to be known. However, the correct simulation of outputs of interest does not need an accurate determination of parameters Z or P_{ini} .

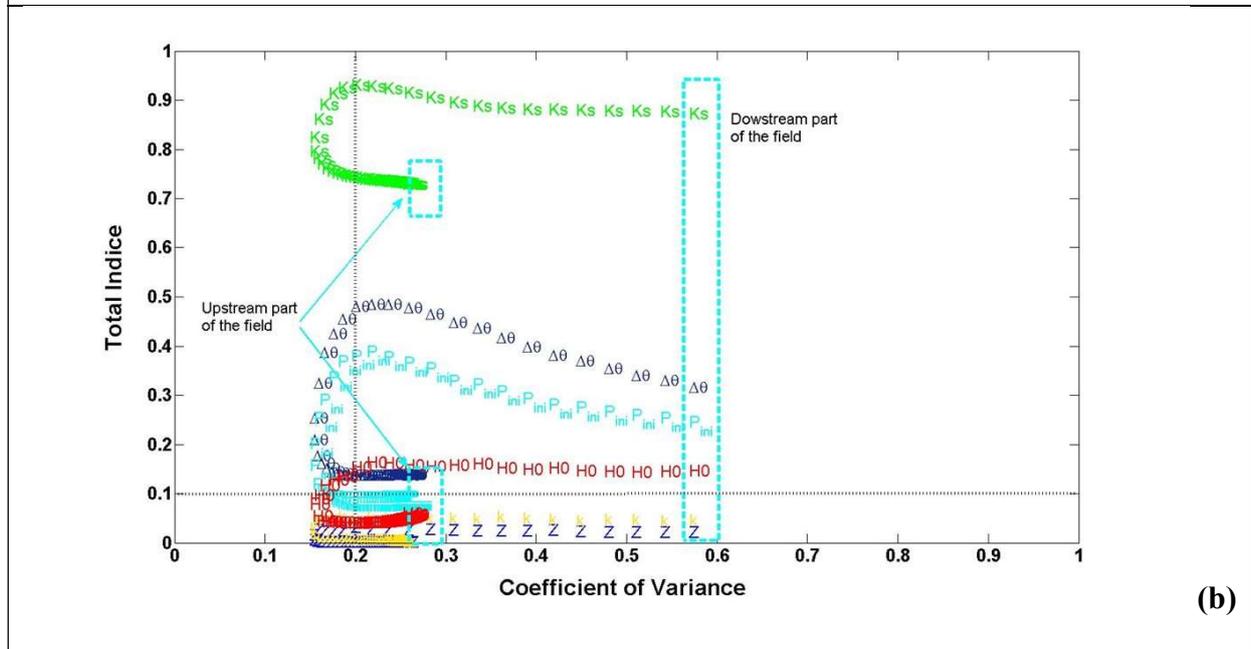
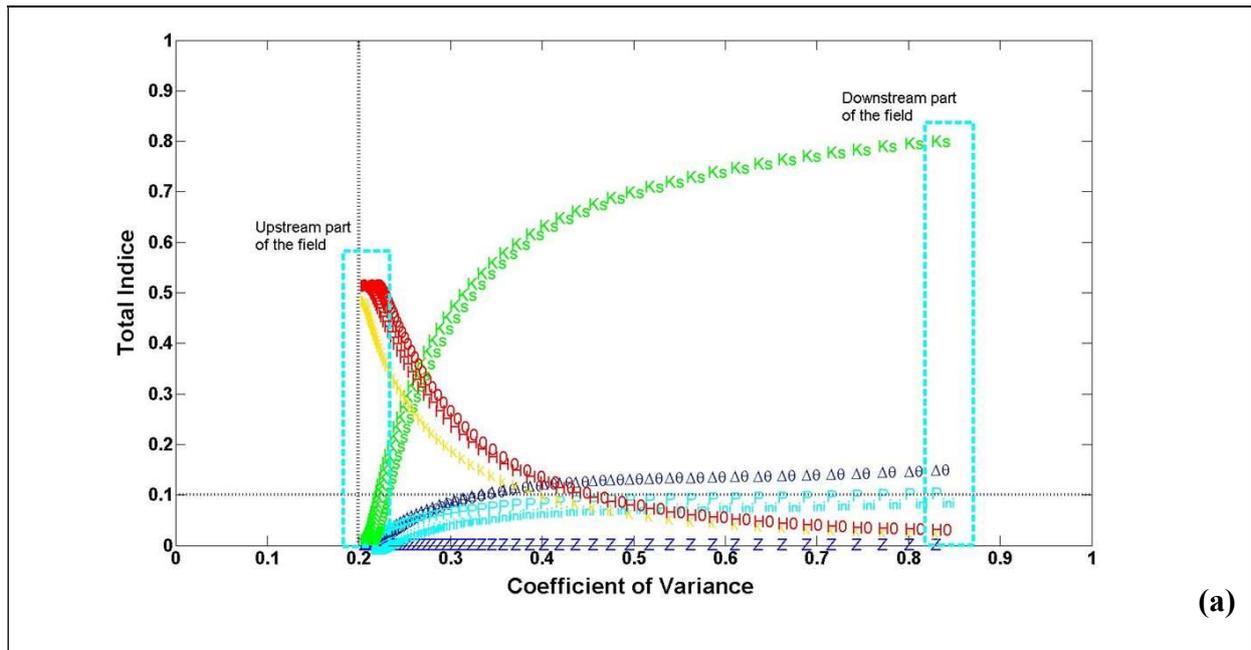


Figure (3) shows the limit of an area of significant sensitivity of each parameter to the outputs of interest. a) H_{mean} ; b) F_{inflt} . The horizontal line is situated at value of ST_i close to 10% and the vertical line is situated at a value of coefficient of variance of an output close to 0.20.

When looking ahead for parameter estimation through inverse modelling methods, it seems promising to monitor experimental variables related to H_mean in the upstream part of the plot, in order to estimate k and H_0 parameters, and in the downstream part of the plot, in order to estimate K_s . Monitoring experimental variables related to L_Infilt in the downstream part of the field could also provide useful information to fit K_s , $\Delta\theta$, P_{ini} and H_0 parameters, despite that monitoring infiltration flux can be a difficult task.

b. Global sensitivity analysis of proxy outputs to parameters of CALHY model

During the simulation process, the sensitivity indices of *proxy* outputs T_arrive and $T_submersion$ have not been computed on the downstream part of the plot. Indeed, propagation of the runoff front may stop in the upstream part of the plot for some combination of parameters values due to a high roughness coefficient (a low value of k) and a high soil infiltration capacity (a large value of K_s) (Bader et al., 2010; Clemmens, 2009). So the sensitivity indices for these proxy outputs were computed from the inlet of plot to the maximum distance where the water has been reached in all model simulations.

For each of the four *proxy* outputs, main and total effect sensitivity indices (S_i and ST_i respectively) were estimated as a function of the location in the field from the upstream part to the downstream part of the plot and are presented in Figure (4) for the main indices S_i and in Figure (5) for S_i and ST_i .

The main effects of each Calhy's parameter to H_max output were presented in Figure 4a. Within the first two thirds of the field length, close to 100% of H_max variance is related to the sum of the main effects of model's parameters. However, this effect decreases to 75% in the last third, the remaining 25% of output variance can be referred to interactions effects between model's parameters. The dominant effect to the variance of H_max output which

exceeds 95% on the first two thirds of field length is related to parameters k and H_0 only with values of S_i close to 60% and 35% respectively. This effect decreases slightly toward the end of the plot and reaches less than 10% for the sum $S_k + S_{H_0}$. The decrease in main sensitivity indices of k and H_0 comes with the increase of the in the one of K_s in the same order of magnitude: S_{K_s} is about 0% in the upstream and increases up to 60% in the downstream of plot. About 10% of H_{max} variance in the last third of plot is related to others model's parameters; $\Delta\theta$, Z and P_{ini} .

The contribution of main effects of Calhy's parameters to variance of T_{arrive} is presented in Fig 4b. It shows an increase of the sum of the main indices from 5% to 95% in the upstream part of plot. The value stays close to 95% in the rest of the plot. The main effects of parameters K_s , k and H_0 to the variance of T_{arrive} range between 10-60%, 40%-20% and 45-15% respectively from the upstream to the downstream of plot. The main effects of parameters $\Delta\theta$, Z and P_{ini} are similar to those observed in H_{max} output and values of the corresponding main sensitivity indices are always less than 10%.

Figure 4c and 4d present the sum of main effects of model's parameters in $T_{submersion}$ and H_{integ} respectively. In both cases, the contribution of main effects of Calhy's parameters to the output variance did not change and was greater than 90% throughout the plot length. For $T_{submersion}$, approximately 85% of the output variance in the upstream part of the plot is referred to the variation in H_0 parameters. Its effect decreases to less than 5% in the downstream part of the plot. The principal effect of parameter K_s is low in the upstream part, but increases toward the downstream part up to more than 65% of variance in $T_{submersion}$. About 20% of variance of $T_{submersion}$ in downstream of plot is explained by the variations on parameters $\Delta\theta$ and P_{ini} . No effects are measured for parameters k and Z to the variance of $T_{submersion}$ output. For H_{integ} output, more than 95% of its variance in the upstream part

is apportioned between the main effects of parameters H_0 and k ; the main effect for each parameters is closed to 50%. Their effects decreases along the field length up to less than 5% in the downstream part of the plot. The principal effect of parameter K_s shows a reverse evolution and increases from $\sim 0\%$ to about 80%.

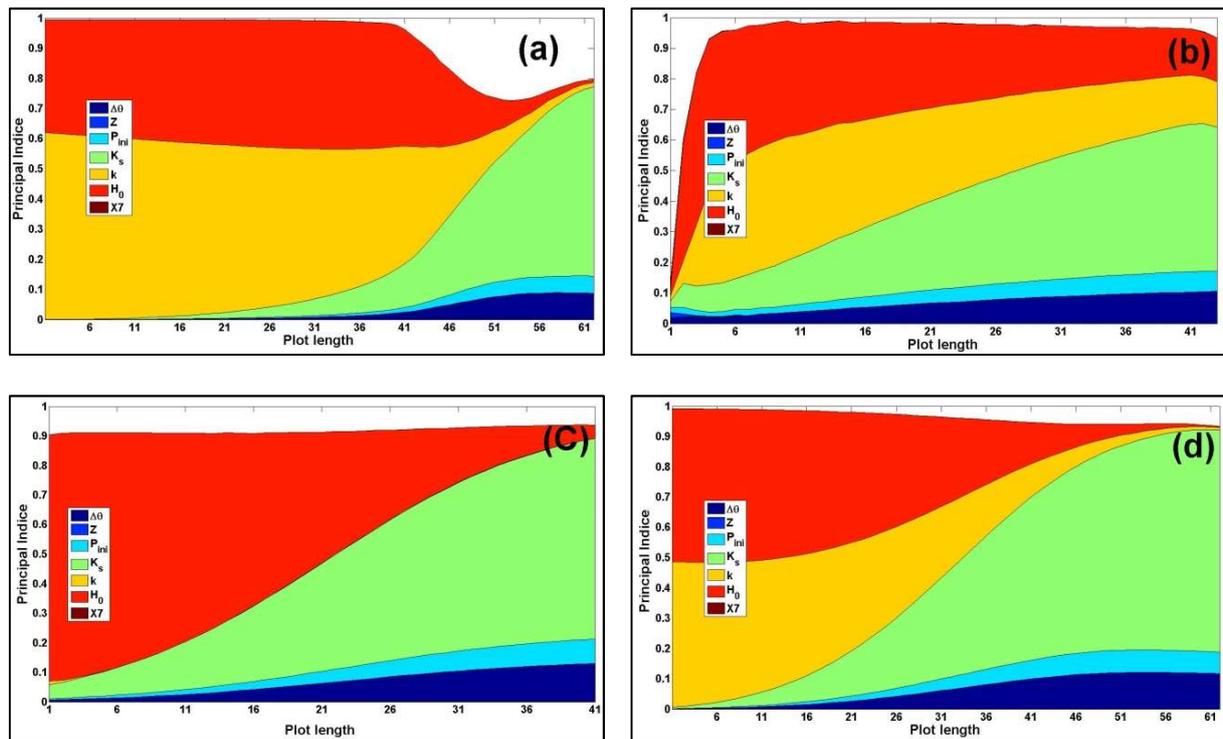


Figure (4). Main indices of the five soil parameters for each *proxy* output as a function of the location in the field. Left side of each plot corresponds to the upstream part and inlet of the field, whereas right side correspond to the downstream part and outlet of the field. (a) : *proxy* output H_{max} ; (b) : *proxy* output T_{arrive} ; (c) *proxy* output $T_{submersion}$; (d) *proxy* output H_{integ} . The white upper section represents the effect of interactions between parameters on the output variations.

For overall simulation of variance of *proxy* outputs presented above, parameters have strong main index and they show little interaction except for H_{max} in the downstream part of the plot and for T_{arrive} in the very upstream part of the field (see Figure 5). For output H_{max} (Fig 5a), soil parameters K_s , $\Delta\theta$ and P_{ini} present largest interactions with others parameters in the downstream part of the field, whereas the interactions of k and H_0 with others parameters

are lower. For T_{arrive} (Fig 5b), all parameters present interactions with others parameters but only near the inlet of the field : variations of value of T_{arrive} is not straightly related to a given parameter in this field location. For $T_{submersion}$ (Fig 5c), only K_s and H_0 present some interactions but the level of this interaction is small and always less than 10% of the output variance.

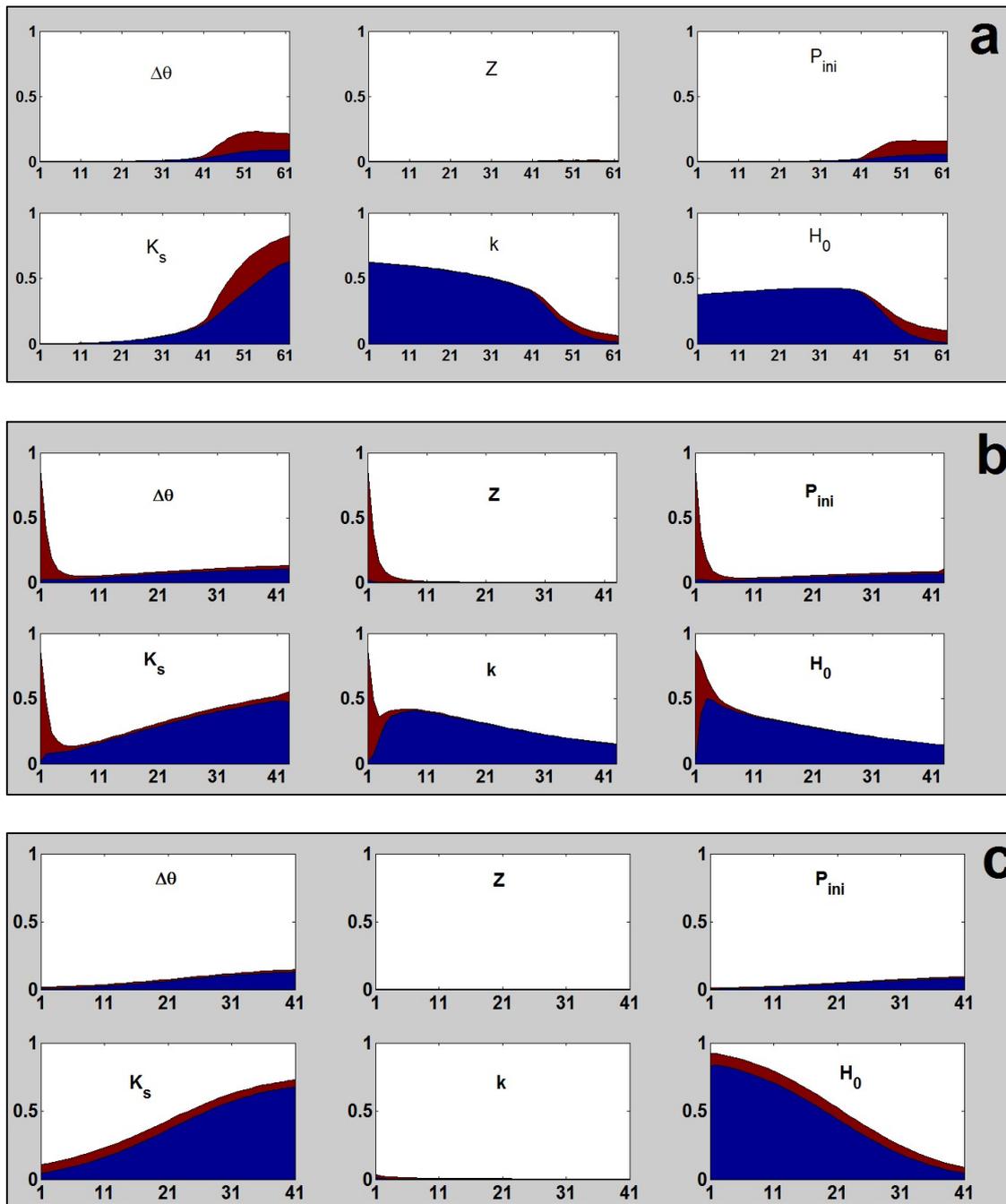


Figure (5). Total and sensitivity index of three *proxy* outputs to model's parameters. (a), (b) and (c) correspond respectively to H_{max} , T_{arrive} , and $T_{submersion}$ outputs. Main indices are in blue, interactions effects between parameters are in red, total indices are the sum of the blue + the red curves.

Total sensitivity indices are now analysed in relation with the value of the coefficient of variations $CV(y)$ of the different *proxy* outputs y (see Figure 6). As in the previous sections we defined two threshold values, one for $ST_i = 10\%$ and another one for $CV(y) = 20\%$. In Table 2 we computed some basics statistics on the *proxy* outputs on two cross sections in the field, one located in the upstream part and the other one located in the downstream part of the plot. This table shows that CV increase from the upstream section to the downstream section whatever the proxy output and that they are usually greater than 20% . We therefore consider that the threshold of 20% for the CV is well adapted to our study.

Figure 6a shows that the CVs for the proxy variable H_max ranged between 18% in the upstream part of the plot, and 65% in the downstream part of the plot. Upstream, the two parameters k and H_0 have a total index S_i close to 40% , whereas parameter K_s is the only one with a large total index S_{K_s} (close to 65%) downstream. This results are similar to the ones obtained in the previous section on output H_mean . As variations of the value of H_max is related to variations of k and H_0 values upstream and to variations of K_s values downstream, the estimation of models parameters through inverse modelling method may be achieved through the monitoring of H_max in a upstream and in a downstream cross section of the field.

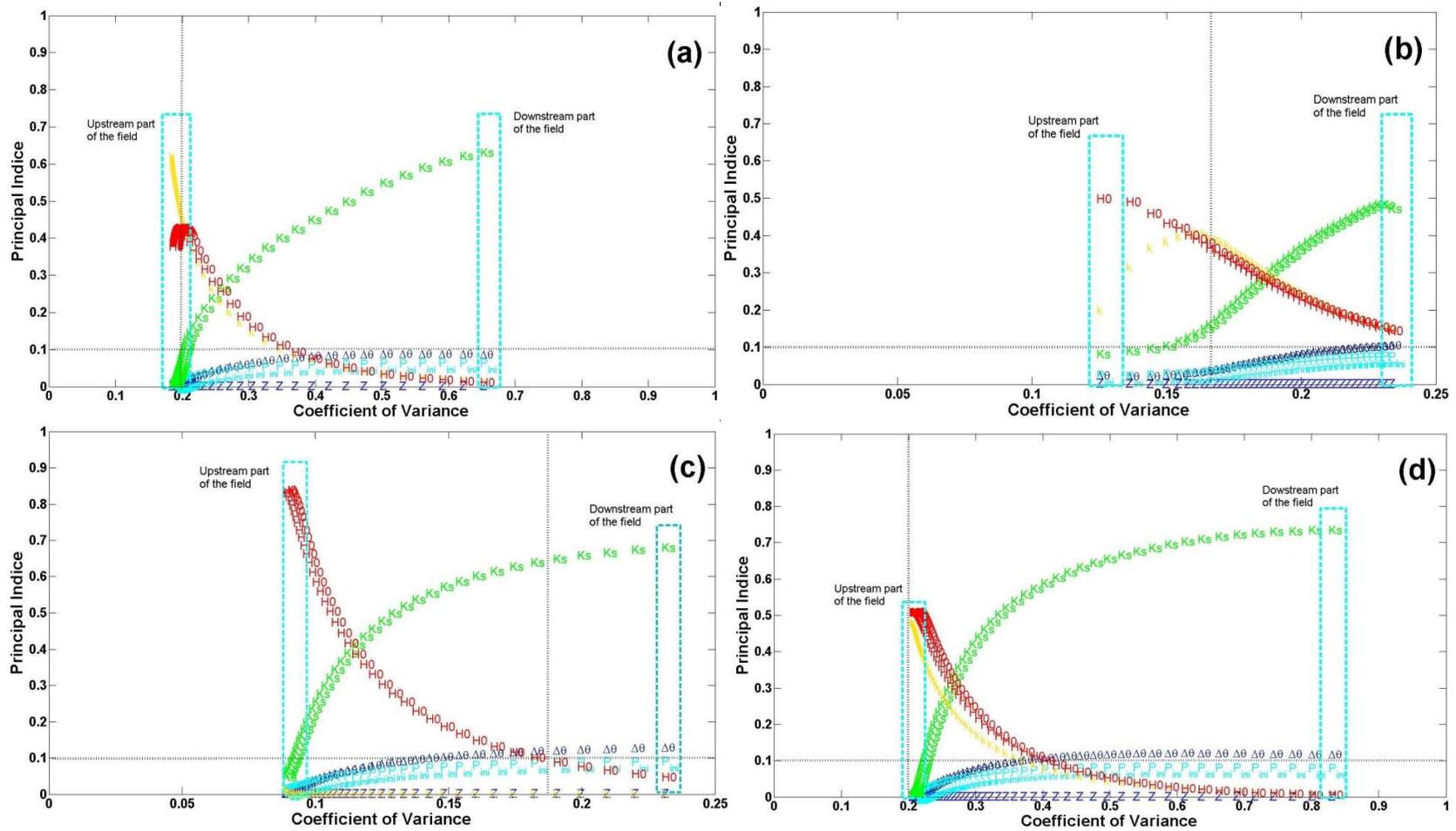


Figure (6) shows the significant sensitivity area limits with 0.20 of coefficient of variance and 10% of S_i for each Calhy's parameter to the *proxy* outputs; a) correspondent to H_{max} ; (b) correspondent to T_{arrive} ; (c) correspondent to $T_{submersion}$ and d) correspondent to H_{integ} . For all figures, the upstream part (respect. the downstream part) of the field is located on the left hand side (respect. the right hand side) of the figure.

<i>Proxy</i> output	Upstream section				Downstream section			
	<i>Min</i>	<i>Mean</i>	<i>Max</i>	<i>SD</i> (<i>CV</i>)	<i>Min</i>	<i>Mean</i>	<i>Max</i>	<i>SD</i> (<i>CV</i>)
<i>H_max</i> (mm)	64.9	104.6	158	18 (17%)	0	53	132	34 (64%)
<i>T_arrive</i> (hour)	0.08	0.15	0.11	0.01 (7%)	0	5.4	11.03	1.1 (20%)
<i>T_submersion</i> (hour)	7.1	7.8	11	0.68 (9%)	0	3.55	10.25	2.5 (70%)
<i>H_integ</i> (mm/hour)	453	771	1.2e+3	154 (20%)	0	185	641	152 (82%)

Table (2). Statistics on *proxy* outputs computed on two cross sections of the field from all simulations results obtained with the EFAST method. *SD* is for the standard variation and *CV* is for the coefficient of variation $CV=SD/Mean$.

Figure 6b shows the evolution of main sensitivity index of *proxy* output *T_arrive* to every parameter. Except in the downstream part of the field, $CV(T_arrive)$ is always less than 20%: this *proxy* output is not sensitive to any of the parameters in the major part of the field, except downstream where it is mainly sensitive to K_s ($S_{K_s} = 48\%$). In the upstream part of the field, despite the high contribution of parameter H_0 and k to the variance of this *proxy* output with ST_k and ST_{H_0} values higher than 40%, $CV(T_arrive)$ is less than 15%. For the upstream section used in Table 2, $CV(T_arrive)$ is about 7 % : the value of *T_arrive* is more or less constant in the first upstream sections of the field and its value does not depend on the studied parameters, but may be to other parameters such as the field slope or the injected water flow. In the perspective of the estimation of models parameters through inverse modelling, the

monitoring of T_{arrive} in upstream part of the field may not provide enough information to estimate H_0 and k parameters despite their high sensitivity indices. On the contrary, the high value of $CV(T_{arrive})$ in the downstream section used in Table 2 may provide enough information for estimating the most sensitive parameters (K_s , then H_0 and k).

As for T_{arrive} , only $T_{submersion}$ output in downstream section has a CV higher than 20% with a high value of $SD=2.47$ hours (see Table 2). Total sensitivity indices of K_s and $\Delta\theta$ are greater than 10% (see Fig 6c). As a consequence, we may suggest that the monitoring of $T_{submersion}$ in a downstream cross section of the field could be useful for the estimation of these two parameters.

Figure 6d shows that the CV 's values for the H_{integ} output are close to 20% upstream and reach 83% downstream. Two parameters have main effects close to 50% upstream: these are parameters k and H_0 . Downstream, parameter K_s with S_{K_s} close to 80% is the most sensitive parameter, the second one being parameter $\Delta\theta$ with $S_{\Delta\theta} = 15\%$. Therefore data of H_{integ} monitored in the two sections of plot can improve the estimation of all these parameters.

From the overall results presented above and looking ahead for the estimation of models parameters with inverse modelling approach through the *in situ* monitoring of variables related to the dynamic of the water height at the field surface during irrigation, we can suggest an experimental monitoring design sensitive to the parameters to estimate. The monitoring of hydrographs during irrigation in two cross sections of the field, one located upstream and the other one located downstream enables the computation of simple *proxy* outputs whose variations are related to the value of the parameters to estimate, as shown in this section and summarized in Table 3.

	$\Delta\theta$	Ks	k	H_0
Upstream cross section	-	-	H_{max} H_{integ}	H_{max} H_{integ}
Downstream cross section	$T_{submersion}$ H_{integ}	H_{max} T_{arriv} $T_{submersion}$ H_{integ}	T_{arriv}	T_{arriv}

Table (3). Synthesis table showing the kind of *proxy* variables to calculate in two cross-sections of the field in order to estimate the parameters of CALHY model.

4. Conclusion

Surface irrigation models provide a good understanding of irrigation system behavior through predicting the main hydraulic processes such as water propagation over the soil surface and water infiltration into the soil. These processes are governed by modules requiring different parameters. The knowledge of these parameters depends on their nature. Some of them are easy to measure directly as those related to the geometry of the field or those related to the irrigation management such as irrigation duration, injected discharge etc... On the other hand, some parameters are difficult to measure at the field scale, due to their spatial variability (as for the soil hydraulic conductivity) or their conceptual nature (as for the roughness coefficient of Manning for surface water flow). In that case, parameters values must be defined, either from automatic fitting methods that may involves inverse modeling approach, or by using predefined values found in the literature. The accuracy needed on the knowledge of parameters values will depend on the sensitivity of the model to these parameters. Sensitivity analysis methods are usefull tools in order to assess this sensitivity and/or to define experimental monitoring designed for an accurate estimation of unknown parameters.

In this study we investigated the global sensitivity analysis (GSA) of a surface irrigation model called “Calhy” using the EFAST method. Six parameters (Manning roughness

coefficient k , amount of water stored at the soil surface H_0 , soil water depletion $\Delta\theta$, soil hydraulic conductivity at saturation K_s , soil water suction at the infiltration front P_{ini} , soil depth Z) related to the modeling of water flow at the soil surface and to the modeling of water infiltration into the soil must be known. The GSA was performed in two step depending on the goal of the GSA and on the king of studied variables. The first set of studied variables are operational outputs of the model involved in the water balance computation and useful for the analysis of the modeled irrigation system. These variables are the mean water height during the irrigation at a given location in the field, the amount of infiltrated water at the end of the irrigation at a given location in the field and the mean infiltrated water amount at the end of the irrigation at the field scale. The sensitivity of these variables to the model parameters has been assessed through the calculation of sensitivity indices and through the calculation of the coefficient of variation of these variables. Results show that four parameters have a significant effect on the mean water height at the soil surface during irrigation: K_s , k , H_0 and $\Delta\theta$. Only two parameters have an impact on the variance of the infiltrated water: K_s and $\Delta\theta$. Parameters Z (soil depth) and P_{ini} (soil suction at the infiltration front) are the less sensitive parameters.

The second set of variables were called “*proxy variables*” and were calculated from the evolution of the water height at the soil surface during the irrigation in two cross sections of the field, one located upstream and the other one locate downstream. The goal of this second GSA step was to identify an experimental monitoring system to be setup in the field and designed for an accurate estimation of unknown parameters. We showed a high sensitivity of the proxy variables to parameters k , H_0 , K_s and $\Delta\theta$ and we showed that this sensitivity depends on the variable and on its location in the field. These results suggest that an experimental monitoring system based on the monitoring of the water height at the soil surface in an upstream section of the field and in a downstream section of the field could be appropriate for the estimation of 4 parameters over 6. Results show also that the two

remaining unknown parameters, Z and P_{ini} have little influence on the output of interest studied in the first step of the GSA.

References

- Bader, J.C., Saos, J.L., Charron, F., 2010. Model of border irrigation runoff, advance and infiltration on a soil covering a very permeable subsoil. *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.* 55, 177–191. doi:10.1080/02626660903546050
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., 2009a. Optimal and Postirrigation Volume Balance Infiltration Parameter Estimates for Basin Irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135, 579–587. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000018
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Schlegel, J., 2009b. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agric. Water Manag.* 96, 1146–1154. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.007
- Benham, B.L., Reddell, D.L., Marek, T.H., 2000. Performance of three infiltration models under surge irrigation. *Irrig. Sci.* 20, 37–43. doi:10.1007/s002710000020
- S. Buis, D. Wallach, S. Guillaume, H. Varella, P. Lecharpentier, M. Launay, M. Guerif, J.E. Bergez, E. Justes, The STICS crop model and associated software for analysis, parameterization and evaluation. In: Ma, L.R.A.a.L. (Ed.), *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. Advances in Agricultural Systems Modeling 2.* Am. Soc. Agron., Crop Sc. Soc. Am., Soil Sc. Soc. Am., Madison, 2011, pp. 395-426.
- Charnes, A., Frome, E.L., Yu, P.-L., 1976. The equivalence of generalized least squares and maximum likelihood estimates in the exponential family. *J. Am. Stat. Assoc.* 71, 169–171.
- Cibin, R., Sudheer, K.P., Chaubey, I., 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrol. Process.* 24, 1133–1148.
- Clemmens, A.J., 2009. Errors in Surface Irrigation Evaluation from Incorrect Model Assumptions. *J. Irrig. Drain. Eng.-Asce* 135, 556–565. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000059
- Cukier, R.I., Fortuin, C.M., Shuler, K.E., Petschek, A.G., Schaibly, J.H., 1973. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I Theory. *J. Chem. Phys.* 59, 3873–3878.
- Cukier, R.I., Schaibly, J.H., Shuler, K.E., 1975. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. III. Analysis of the approximations. *J. Chem. Phys.* 63, 1140–1149.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Ghanbarian-Alavijeh, B., Abbasi, F., 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrig. Sci.* 28, 479–488. doi:10.1007/s00271-010-0209-5
- Elliott, R.L., Walker, W.R., 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions [irrigation; Colorado]. *Trans. ASAE Am. Soc. Agric. Eng.*
- Foglia, L., Hill, M.C., Mehl, S.W., Burlando, P., 2009. Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resour. Res.* 45.
- Gillies, M.H., Smith, R.J., 2015. SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. *Irrig. Sci.* 33, 339–355.

- Gillies, M.H., Smith, R.J., Raine, S.R., 2006. Accounting for temporal inflow variation in the inverse solution for infiltration in surface irrigation. *Irrig. Sci.* 25, 87–97.
doi:10.1007/s00271-006-0037-9
- Iooss, B., Lemaître, P., 2015. A review on global sensitivity analysis methods, in: *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems*. Springer, pp. 101–122.
- Katopodes, N., Tang, J., Clemmens, A., 1990. Estimation of Surface Irrigation Parameters. *J. Irrig. Drain. Eng.* 116, 676–696. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:5(676)
- Mailapalli, D.R., Wallender, W.W., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., 2008. Quick method for estimating furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134, 788–795.
- Makowski, D., Naud, C., Jeuffroy, M.-H., Barbottin, A., Monod, H., 2006. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91, 1142–1147.
doi:10.1016/j.res.2005.11.015
- Mishra, S., 2009. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for hydrologic modeling. *J. Hydroinformatics* 11, 282–296.
- Nelder, J.A., Mead, R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *Comput. J.* 7, 308–313. doi:10.1093/comjnl/7.4.308
- Risse, L.M., Nearing, M.A., Savabi, M.R., 1994. Determining the Green-Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model. *Trans. ASAE* 37, 411–418.
- Robertson, D., Wood, M., Wang, Q.J., 2004. Estimating hydraulic parameters for a surface irrigation model from field conditions. *Aust. J. Exp. Agric.* 44, 173–179.
doi:10.1071/ea02191
- Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M., others, 2000a. *Sensitivity analysis*. Wiley New York.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., 2000b. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Stat. Sci.* 377–395.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K.P.S., Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output, *Technometrics* 41 (1999) 39-56.
- Shepard, J.S., Wallender, W.W., Hopmans, J.W., 1993. One-point method for estimating furrow infiltration. *Trans. ASAE USA*.
- Sobol, I.M., 2001. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Math. Comput. Simul.* 55, 271–280.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., Xu, C., 2015. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *J. Hydrol.* 523, 739–757. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.02.013
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., 2007. *Hydraulics of surface systems*. Des. Oper. Farm Irrig. Syst. J Hoffman Al.
- Timlin, D., Pachepsky, Y., Walthall, C., Loechel, S., 2001. The use of a water budget model and yield maps to characterize water availability in a landscape. *Soil Tillage Res.* 58, 219–231.
- Varella, H., Buis, S., Launay, M., Guérif, M., 2012. Global sensitivity analysis for choosing the main soil parameters of a crop model to be determined. *Agric. Sci.* 3, 949.

- Varella, H., Guérif, M., Buis, S., 2010. Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation: The case of soil parameters and a crop model. *Environ. Model. Softw.* 25, 310–319.
- Walker, W.R., 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131, 129–136.
- Wang, W., Jiao, X., Peng, S., Ma, H., 2007. Linear regression approach for estimating soil infiltration parameters of border irrigation [J]. *J. Hydraul. Eng.* 4, 13.
- Weibo, N., Liangjun, F., Xiaoyi, M., 2012. Estimated Infiltration Parameters and Manning Roughness in Border Irrigation. *Irrig. Drain.* 61, 231–239. doi:10.1002/ird.624

3.2 Inversion du modèle Calhy :

“Estimation Of Soil Hydrodynamic Parameters And Soil Hydraulic Roughness Through Inverse Modelling And Flooding Irrigation Experiments”

Le chapitre précédent a permis d'une part d'identifier les paramètres auxquels le modèle CALHY est sensible, et d'autre part de définir un dispositif de mesure relativement simple à mettre en œuvre et permettant de mesurer des variables caractérisant les irrigations et présentant une forte sensibilité aux paramètres. En se basant sur les résultats de l'analyse de sensibilité présentée dans le précédent chapitre, nous avons déployé un dispositif expérimental adapté sur différentes parcelles agricoles afin d'estimer par méthode inverse les quatre principaux paramètres hydrodynamiques et hydrauliques du sol présents dans le modèle Calhy :

- la conductivité hydraulique à saturation K_s ($m\ s^{-1}$),
- le coefficient de frottement hydraulique k ($m^{1/3}\ s^{-1}$),
- le paramètre $\Delta\theta$ ($m^3\ m^{-3}$) qui représente la différence de teneur en eau entre l'état initial avant le début de l'irrigation et l'état saturé,
- le paramètre H_0 (m) qui représente l'eau retenue par les microreliefs de la surface du sol.

Méthodes et démarches

Deux parcelles de caractéristiques différentes ont été étudiées. Pour la 1^{ère} parcelle située sur le domaine du Merle, 5 irrigations successives ont été étudiées. Pour la seconde parcelle située chez un agriculteur, deux irrigations différentes ont été suivies. L'évolution de la hauteur de la lame d'eau présente à la surface du sol lors de l'irrigation est mesurée sur deux sections transversales à l'écoulement : une section se situe dans la partie amont de la parcelle, une section se situe dans la partie aval. À partir des données expérimentales sur l'évolution de la hauteur d'eau $H(t)$ ruisselée à la surface de la parcelle, les variables secondaires appelées *proxy* variables qui ont été définies dans le précédent chapitre ont été calculées. Ces variables sont celles que le modèle CALHY devra reconstituer au mieux en ajustant de façon automatique la valeur des différents paramètres. L'algorithme d'ajustement utilisé est la méthode SIMPLEX. L'estimation des paramètres a été conduite sur l'ensemble des irrigations sauf une irrigation sur le 1^{er} site qui a été utilisée pour la validation.

La performance de l'approche proposée a été évaluée en trois étapes. Dans un premier temps la **cohérence** des valeurs estimées des paramètres a été étudiée :

- Le paramètre K_s estimé au cours de plusieurs irrigations et sur le même site doit être stable,
- le paramètre k estimé doit évoluer de façon cohérente avec l'état de végétation : il doit diminuer lorsque la prairie se développe.

Dans un second temps, la méthode a été évaluée en comparant les résultats de la simulation avec des données mesurées mais non utilisées dans la procédure d'inversion. Ces données sont les teneurs en eau du sol, les hydrogrammes complets de ruissellement en amont et en aval de la parcelle, ainsi que l'avancée du front de ruissellement à la surface de la parcelle lors de l'irrigation. Des critères statistiques d'erreur (critère RMSE : Root Mean Square Error et critère de Nash-Sutcliffe) ont été calculés sur les hydrogrammes de ruissellement.

Enfin la validation au sens strict est réalisée en comparant les simulations à des données expérimentales qui ne sont pas issues des irrigations utilisées dans la procédure d'ajustement. Ces données sont une des irrigations suivie sur le 1^{er} site expérimental, ainsi que des données issues des travaux de (Mailhol and Merot, 2008).

Résultats

Les résultats montrent que :

- le paramètre estimé K_s est constant sur une parcelle donnée, quelle que soit l'irrigation utilisée pour l'ajustement. Il est de plus comparable à des valeurs trouvées précédemment par (Bader et al, 2010),
- le paramètre estimé k varie de façon cohérente avec le stade de développement de la prairie. Les ordres de grandeurs sont similaires aux valeurs que l'on peut trouver dans la littérature. Les valeurs trouvées sont cependant plus faibles que les valeurs trouvées précédemment par (Bader et al, 2010),
- les paramètres K_s et k sont estimés avec une faible incertitude, alors que le paramètre $\Delta\theta$ a été estimé avec une incertitude modérée,
- le paramètre H_0 est estimé avec une forte incertitude, cependant ce paramètre n'a pas d'influence sur le bilan hydrique ou la dynamique globale de l'irrigation.

Lors de l'évaluation, on montre que les critères d'erreurs sont faibles : les critères de Nash-Sutcliffe sont toujours supérieurs à 0.85 et peuvent atteindre la valeur de 1.00 pour la reconstitution des hydrogrammes de drainage.

Lors de la validation, le modèle permet également de bien reconstituer les données mesurées, qu'il s'agisse des hydrogrammes de ruissellement (critère de Nash-Sutcliffe supérieur à 0.90, RMSE inférieure à 9 mm) ou de la propagation du front de ruissellement à la surface du sol (RMSE compris entre 5.1 m et 7.4 m).

Nous concluons que l'algorithme d'inversion (méthode du SIMPLEX) associé à un dispositif expérimental relativement léger basé sur le suivi en continu de la lame d'eau dans les parties amont et aval de la parcelle, complété par la connaissance du débit d'irrigation injecté, permet d'estimer les paramètres hydrodynamiques et hydrauliques qui ont le plus d'influence sur la dynamique de l'irrigation et son bilan hydrique. Cette approche peut être déployée sur de nombreuses parcelles ou calans si celles-ci fonctionnent selon les hypothèses du modèle, à savoir des parcelles de forme régulière (rectangulaire) où la lame d'eau se propage dans une seule direction et où l'eau peut s'évacuer librement en aval de la parcelle (existence d'un canal de colature) : elle permettrait d'une part de faire des bilans précis pour chaque parcelle et d'autre part de spatialiser les propriétés du sol. Cette méthode nécessite cependant de bien connaître le débit injecté. Le chapitre suivant qui présente les résultats des enquêtes effectuées chez de nombreux agriculteurs, montre que le débit effectivement injecté peut différer significativement des estimations des agriculteurs ou des débits théoriques associés aux ASA concernées.

Ce chapitre a été soumis sous forme d'article à la revue Irrigation Science en juin 2016.

Estimation of soil hydrodynamic parameters and soil hydraulic roughness through inverse modelling and flooding irrigation experiments.

Mohamed ALKASSEM ALOSMAN¹, Stéphane RUY^{1*}, S. BUIS¹, P. LECHARPENTIER¹, J.C. BADER², F. CHARRON³, Albert OLIOSO¹

ABSTRACT :

Surface irrigation; the most widespread irrigation system in the world; is highly water-consuming and therefore needs to be optimized to save water. Surface irrigation models can be used for this purpose but they require soil parameters at the field scale, which is a difficult task. We propose a method to estimate effective soil parameters at the field scale by combining a runoff-infiltration model, namely the CALHY model (Bader et al., 2010), monitoring of surface irrigation and an automatic fitting algorithm based on the SIMPLEX method. The kinematic wave approximation and the Manning Strickler equation were used for runoff simulation, and the Green and Ampt model to simulate soil water infiltration. Four parameters were estimated: the saturated hydraulic conductivity K_s , the hydraulic roughness coefficient k , the soil water depletion Δ and the soil surface depressional storage H_0 . Evolution of the water height at two cross sections of the irrigated field was measured with automatic probes. K_s and k were estimated with a low uncertainty, whereas the estimation uncertainty of parameter H_0 was of the order of magnitude of the parameter value. All experimental data were very well simulated. Performance criteria (Nash coefficient and RMSE) were calculated from the discrepancy between measured and simulated data, and their values calculated during the fitting stage were found to be similar to those calculated during the validation stage. The method was validated using several datasets. It can be used to estimate the effective soil parameters governing flooding irrigation from simple measurements in the field. It can be applied on a large number of fields to analyze current flooding irrigation practices and to propose optimization strategies.

KEYWORDS : flooding irrigation, hay field, grasslands, runoff, infiltration, inverse modeling, kinematic wave, Green and Ampt model.

ACKNOWLEDGEMENTS AND FUNDING INFORMATION:

This work was partly funded by the SICMED program of the French initiative MISTRALS (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales). The PhD of M. Alkassem Alosman was funded by the Syrian government.

The authors wish to thank farmers from the Crau region for providing access to their fields and all the technical staff of UMR EMMAH for their help during the irrigation monitoring.

1- INTRODUCTION

Irrigated agriculture represents about 20% of the total surface of cultivated crop lands (FAO, 2011), but accounts for about 70% of global freshwater withdrawals and for 90% of consumptive water uses (Siebert et al., 2010). The surface of irrigated crop lands is expected to expand in the future in order to contribute to the 70% increase in global crop production required to cope with the rise in world population by 2050 (Bruinsma, 2009). This will induce an increase in water demand for irrigation whereas fresh water resources are very unevenly distributed with an increasing number of countries or regions suffering from water scarcity (Bruinsma, 2009). A mitigating factor could be the optimization of current irrigated systems in order to save water and then to expand the irrigated surfaces on a constant basis of water withdrawals.

Surface irrigation is the oldest form of irrigation system throughout the world. It is also the most widespread, accounting for about 85% of the total irrigated crop lands in 2007 according to (FAO, 2016). Large volumes of water are injected at the plot surface, which may lead to large amounts of water loss either by drainage below the crop rooting depth or by runoff from the plot. It is therefore a highly water-consuming system which can result in a low water use efficiency. Optimization in surface irrigation systems could be reached through improved management practices including changes in field geometry, injection discharge or cut-off times (Clemmens, 2009; Moravejalahkami et al., 2009). In order to accomplish this optimization, a model of surface irrigation is needed. Such models should account for the two main processes driving the irrigation of an agricultural field, namely water infiltration into the soil and runoff propagation at the field surface, and the parameters of these models must therefore be measured or estimated. These parameters include infiltration parameters and field surface roughness parameters, which are difficult to obtain due to spatial variability in the field and to the interaction between these two processes which act in opposite ways: runoff

over the field surface tends to decrease the soil water recharge, whereas infiltration into the soil tends to increase this recharge.

Infiltration is the most important function that has to be estimated or measured in order to determine the volume of water needed and the irrigation duration. Parameters for describing soil water infiltration are related to the hydraulic conductivity curve and the water retention curve but depend on the soil water infiltration model. The difficulty in estimating the infiltration parameters on a physical basis is a major obstacle to improving performance (Ebrahimian et al., 2010; Elliott et al., 1983; Gillies and Smith, 2005; Weibo et al., 2012). Moreover, the required irrigation duration is also influenced by *the flow resistance* (soil topography, vegetation cover), since for a given water discharge during irrigation, the hydraulic roughness factor is related to the water height and to the runoff velocity (Bader et al., 2010; Clemmens, 2009; Galbiati and Savi, 1995; Gillies and Smith, 2015). Therefore, the irrigation duration and water volume needed for surface irrigation should be based on an accurate estimation of both infiltration and soil surface parameters.

Current methods for measuring infiltration such as single- and double-ring infiltrometers are unable to give an accurate estimation of the soil water infiltration parameters at the field scale because of soil spatial variability, which is usually large. Moreover they are costly and time-consuming (Lee and Walker, 1993; Weibo et al., 2012). Inverse methods are therefore usually preferred in order to estimate “average” infiltration parameters at the field scale. In these methods, a runoff-infiltration mathematical model is used to simulate observed data such as the propagation of the runoff front and of the recession front at the soil surface, the runoff hydrographs, the evolution of the water height at the soil surface at specific places in the field, etc. Infiltration parameters of the mathematical model are automatically calculated to obtain the best fit between observed and simulated data (Clemmens, 2009; Ebrahimian et al., 2010; Gillies et al., 2006; Tiscareno-Lopez et al., 1993; Walker, 2005). According to these authors, the more data we have, the better the fit, but a good estimation of the parameters is not

ensured when only a limited set of data is available. It is thus very important to use or develop a method which employs minimal accessible (available) data. As it is costly and time consuming to obtain a lot of experimental data, several authors tried to identify the minimal data set required to obtain a “good” estimation of the parameters.

(Elliott and Walker, 1982) developed *the two-point method* for furrow, basin and border irrigation. They assumed that measuring the advance curve of the runoff front in two points at the plot surface, in the mid and last points of the layout (plot or furrow), was sufficient to estimate the infiltration parameters.

The method is based on a balance volume method (eq. 1) for the mass conservation, a power law function for the advanced phase (eq. 2) and the modified Kostiakov equation (Smith, 1972) for the infiltration rate (eq. 3). The mass conservation is written in its integral form as :

$$Q_0 t = \sigma_y A_0 x + \int_0^x f \partial s \quad (39)$$

where Q_0 is the inflow discharge (m^3/min); t is the time from the start of inflow (min); x is the water front advance (m); s is the distance reached by the advance front at time t (m); A_0 is the cross-section area of inflow (m^2); σ_y is an empirical surface profile shape factor; and f is the cumulative infiltration per unit length ($\text{m}^3 \text{m}^{-1}$).

The empirical relationship between the time and the position of the runoff front is needed.

(Elliott and Walker, 1982) used a power law function:

$$x = p t^r \quad (40)$$

where p (m min^{-r}) and r (-) are constants.

The modified Kostiakov equation for the cumulative infiltration is:

$$f(t) = k t^a + f_0 t \quad (41)$$

in which a (-), k ($\text{m}^2 \text{min}^{-a}$), and f_0 ($\text{m}^2 \text{min}^{-1}$) are constant coefficients.

When the parameters of eq. (1) and eq. (2) are known, the parameters a and k of eq.(3) can be calculated when the position x_1 and x_2 of the runoff front is measured at two times t_1 and t_2 .

However in this method the variations in the advance time between these two points which

are caused by variation in discharge or hydraulic resistance are not accounted for, which may induce an inaccurate estimation of infiltration parameters (Clemmens et al., 1998).

The one point method was proposed by (Shepard et al., 1993) for furrow irrigation. In this method, the Philip infiltration equation (Philip, 1969) is used to express the infiltration rate, which reduces the number of infiltration parameters that has to be estimated. The runoff dynamic is measured at only one point in the field, which is usually located at the end of the furrow.

An alternative one-point method was presented by (Mailapalli et al., 2008) for furrow irrigation. As in the two-point method (Elliott and Walker, 1982), the mass conservation equation, the water advance curve at the soil surface and the infiltration rate are described using the volume balance method, a power law function and the modified Kostiakov equation respectively. In order to reduce the required data (one measurement point instead of two points), the volume balance equation was simplified by proposing a function including the two exponents' parameters; the exponents of the power advance relationship, see eq. (2) and that of the modified Kostiakov equation, see eq. (3). The estimation of the two parameters a and r could be affected by minimizing this function to zero.

(Ebrahimian et al., 2010) proposed *two alternative methods*. The first method was derived from that of (Shepard et al., 1993): they calculated the exponent of the power law function describing the advance of the runoff front from two points in the advance curve instead of assuming that it was constant. The second method is similar to that of (Elliott and Walker, 1982), but they assumed that the exponent of the advance curve function was constant at 0.5 and they measured the position of the advance curve at a single point.

A multilevel calibration technique proposed by (Walker, 2005) used an inflow and outflow hydrograph in order to estimate the infiltration parameters and the value of the flow roughness coefficient of Manning n . Compared to the previous methods, this new procedure provided a better fit of the advance runoff curve and of the recession runoff curve.

All the above-mentioned methods require the calculation or estimation of a surface shape factor σ_y in order to compute the surface volume over the soil surface according to the volume balance equation. This parameter is assumed to vary from 0.7 to 0.8 (Weibo et al., 2012). Some methods proposed to calculate σ_y with the following equation:

$$\sigma_y = \frac{1}{1 + \beta} \quad (4)$$

In eq. (4), the value of the β parameter is either assumed to be constant, equal to 0.25 according to (Gillies and Smith, 2005) or equal to 0.45 according to (Bautista et al., 2009), or is fitted as a function of system properties and evolves with time and with the distance of water advance (E. Bautista et al., 2012; Valiantzas, 1993). All these approaches assume that this factor is constant with time. This may lead to errors in the estimation procedures (Clemmens, 2009; Gillies et al., 2006). Moreover ignoring the variation in irrigation discharge Q_0 during irrigation could compromise the accuracy of results when the volume balance method is used (Bautista et al., 2009c; Gillies et al., 2006).

(Wang et al., 2007) tried to avoid the estimation of the surface storage shape factor by proposing a method to estimate the soil infiltration parameters of border irrigation, based on the volume balance and collected data of spatial and temporal variation of the water depth at the soil surface at several locations along the field.

(Bader et al., 2010) proposed a new method to estimate the infiltration parameters and soil surface parameters for submersion irrigation of hay fields. The Green and Ampt equation (Green and Ampt, 1911) was used for the infiltration rate, and the kinematic wave approximation or the diffusive wave approximation of the St Venant equation for the runoff dynamic at the soil surface. The experimental data set was composed of the observed water advance curve all along the field, the runoff discharge at the inlet and outlet of the field. Fitted parameters were the saturated hydraulic conductivity, the soil water storage capacity, the Manning Strickler roughness coefficient k and the soil surface detention (water height retained by the soil surface micro-topography). In the remainder of this article, the Manning

Strickler roughness coefficient, usually denoted k , will be used as the flow resistance coefficient. This coefficient is the inverse of the Manning roughness coefficient $n = 1/k$.

Several combinations of infiltration and flow resistance parameters can fit the same water advance curve for a given discharge (Clemmens, 2009; Clemmens et al., 1998): the propagation of the runoff front may slow down because of either a high infiltration rate or a low flow roughness (a high value of the Manning Strickler roughness coefficient, k). This is a common problem with inverse methods, known as equifinality. Thus having enough information about the roughness factor k could make the infiltration parameter the only one that controls the advance time. When dealing with furrow irrigation, the water front propagates at the soil surface on a more or less bare surface, and values of the roughness coefficient can be assumed or found in different tables. These approaches were used in the above-mentioned methods. When dealing with flood irrigation, the water front propagates at the soil surface through the vegetation, and it is difficult to estimate the roughness coefficient: for irrigated pasture, the Manning Strickler roughness coefficient becomes increasingly significant and tends to vary with the plant height, the water depth and the flow velocity (Gillies and Smith, 2015; Robertson et al., 2004; Wilson, 2007).

In (Bader et al., 2010; Wang et al., 2007), the authors included more data such as water depth in several locations, runoff discharge and water volume losses from the plot to avoid the equifinality problem. These additional data are however very difficult to obtain in border irrigation (Weibo et al., 2012) or cannot be precisely determined. Moreover, any errors in measurements used in the estimation procedures could lead to a wrong estimation of the infiltration and roughness parameters (Gillies et al., 2006; Robertson et al., 2004).

The aim of the present study is to propose a new method to estimate infiltration and soil surface parameters during flooding irrigation of hay fields. The method is based on a mathematical model of the runoff dynamic at the field surface in which the infiltration rate is

described by the Green and Ampt equation and the water flow at the surface is described by the kinematic approximation of the St Venant equation. The parameters to be estimated are the two parameters of the infiltration equation, i.e. the field saturated hydraulic conductivity K_s and the soil water storage $\Delta\theta$, and the two parameters of the runoff propagation equation, i.e. the Manning-Strickler roughness coefficient k and the soil surface detention H_0 . Estimation of the parameters is based on an inverse modeling method and on observed data that can be easily measured at two points located at the surface of the field.

2- Materials and methods

2.1. Model of border irrigation ; Runoff, Advance and Infiltration,

In this study we used the CALHY model which is a physically based model originally developed in an MS Excel spreadsheet by (Bader et al., 2010). The model was recoded in the Matlab framework under the form of function code accompanied with a call-script including all the required input data. The model describes (i) the water propagation (runoff) at the field surface and (ii) the soil infiltration during an irrigation event. Moreover it can provide useful information about the irrigation dynamics. The surface runoff is one dimensional and is described by the kinematic wave approximation of the Saint Venant equation (5). The relation between the water height and the flow velocity is explained by the Manning-Strickler relationship (6). The soil infiltration is modeled by the Green and Ampt equation (7). The governing set of equations is as follows:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_{rl}}{\partial x} = -f \quad (5)$$

$$Q_{rl} = k \times \max(0; H - H_0)^{5/3} (I)^{1/2} \quad (6)$$

$$f = K_s \left(1 + \frac{(\theta_s - \theta_i)(P_{ini} + H)}{F} \right) \quad (7)$$

$$F(x, t) = \int_{\tau=0}^{\tau=t} f(x, \tau) d\tau \quad (8)$$

where K_s is the soil saturated hydraulic conductivity (m s^{-1}), k is the Manning-Strickler Roughness factor ($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$), $\Delta\theta$ is the soil water depletion ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) represented by the difference between the saturated water content θ_s and the initial water content θ_i , P_{ini} is the matric suction behind the infiltration front (m) and H_0 is the water height retained at the soil surface by the vegetation and the soil micro-topography (m). H_0 is the depression storage, i.e. the water volume that has to be filled at the soil surface before runoff starts (Amoah et al., 2013). The other inputs required include the field slope I (m m^{-1}), the inflow rate per unit field width Q_i ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and the field length (m).

The main outputs are: f the instantaneous soil infiltration flow (m s^{-1}), F the cumulative infiltration (m), H the water height at the soil surface (m) and Q_{rl} the water discharge per unit width of the field ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

The CALHY model is solved according to the numerical scheme described by (Bader et al., 2010), which is a time explicit scheme with a constant time step Δt . All variables are calculated at each time step along a regular grid with a Δx space step along the runoff propagation direction.

2.2.Site of measurements

Field location

The study was carried out in the Crau region in southern France where flooding or border irrigation is used in order to irrigate more than 12000 ha of grassland. In this region hay fields are levelled lengthwise, with a gentle slope ranging from 2.5‰ to 21‰ but usually less than 4‰. The irrigation discharge is injected all along the upstream width of the plot until the runoff front reaches the end of the plot. Then the irrigation discharge is stopped and the amount of water at the field surface is evacuated as infiltration or runoff from the plot. In order to save water, farmers usually stop the irrigation when the runoff front reaches a certain percentage of the total field length, This decision is based on their expert knowledge and takes into account the discharge value, the field slope and the runoff velocity (Bader et al., 2010; Merot et al., 2008b).

A typical flooding irrigation (conducted in the field or simulated by the model) results in the propagation of a runoff front at the soil surface from the upstream part to the downstream part of the field, and then in the disappearance of water after the end of irrigation.

Soil description

In this study, 7 irrigation events were monitored in two different sites. The first site is the “1J plot” located in the experimental facilities of the “Domaine du Merle” located near the town of Salon de Provence and the second site is situated near the Entressen mere. The soil of the

first site is a calcic ferresiallitic luvisol, stony and stratified (Bouteyre and Duclos, 1994; Merot et al., 2008b; Mohammed et al., 2016), composed of (i) an upper loam horizon accumulated from the sediments which are brought by irrigation water from the Durance river, poor in gravels (about 5%) with a thickness of 10-15 cm, (ii) an intermediate layer of loamy sand (from 15 to 75% stones) and (iii) a fissured hardened stony sandy layer which is found at a depth between 0.45 and 0.65 m.

In the second site, the soil is complex between loam-clay with presence of a clay substrate and a hydromorphous loamy upper horizon, rich in organic matter. The soil depth is limited to 0.2 m due to the presence of the same hardened horizon (Bouteyre and Duclos, 1994).

2.3. Monitoring of the water height at the field surface

A mobile device was used to monitor the water height at the field surface during the irrigation. During each irrigation event, the evolution of the water height at the soil surface was measured with automatic probes and data loggers in two cross sections of each plot. These sections were located at 10% (upstream section) and 90% (downstream section) of the total field length. Water height measurements were replicated three times at each section with Campbell Scientific CS616 soil moisture probes which were installed vertically with a 10 cm insertion into the soil. These probes were calibrated and a linear relationship between the recorded signal of the probes and the water height was obtained, with a mean R^2 of 0.99 as shown in Fig. (1). As the length of the CS616 moisture probes is 30 cm, the maximum water height that could be measured was about 20 cm, the usual maximum water height obtained during flood irrigation of hay crops in the Crau area being about 10 cm. The probes were connected to a Campbell Scientific CR1000 data logger and measurements were made and stored every 30s.

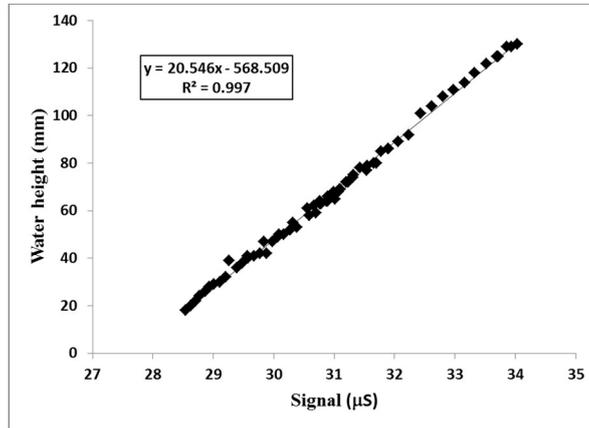


Figure (1): Typical calibration curve of the soil moisture probes CS616 in order to convert the probe signal (in μs) into water height (in mm) at the soil surface.

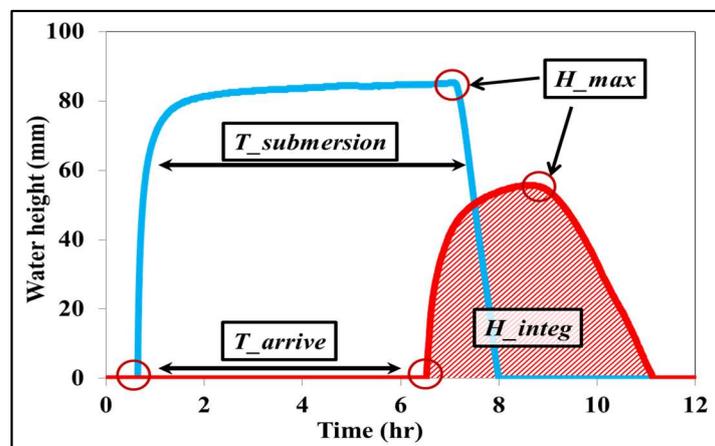


Figure (2): Time evolution of water levels during an irrigation event in two locations in the field. The first blue curve was obtained in the upstream section of the field, and the second red curve in the downstream section of the field. Proxy-variables are given on this figure.

The typical evolution with time of the water height in the upstream and downstream sections is presented in Fig. (2). In both sections, the curves are qualitatively similar. To begin with, the water height is constant and equal to zero from the beginning of the irrigation to the arrival of the runoff front at the measurement point. For this irrigation, the arrival time of the irrigation front at the upstream section is about 0.5 hour and about 4.7 h in the downstream section.

Then we observe an increase in the water height up to a constant value that corresponds to the maximum value of the water height obtained during the steady state flow regime. This increase is sharper in the upstream section than in the downstream section, due to the

dispersion of the runoff front along the field slope. The maximum value of the water height in the upstream section is greater than the one in the downstream section. In the upstream section the water discharge is almost the same as the injected irrigation discharge as this section is located near the entrance of the flow in the field, whereas in the downstream section this discharge is equal to the injected irrigation discharge minus the cumulative infiltration flow from the upstream to the downstream section. At the end of the steady state flow regime, we observe a sharp (respectively smooth) decrease in the water height in the upstream section (respectively downstream section) from its maximum value to zero. This is due to the arrival time of the recession front which develops at the end of the irrigation. As for the runoff front, the dispersion along the field slope is responsible for the difference in the shape of the recession curves between the two sections. All these characteristics can be described by a kinematic wave model such as the CALHY model.

2.4.Measurement of soil characteristics

Soil samplings with augers were carried out before and after each event in order to determine the Soil samplings with augers were carried out before and after each event in order to determine the soil water content profile and the soil water depletion $\Delta\theta$. For each event, three replicates at the upstream section and three replicates at the downstream section were used to calculate the mean soil water content. The soil volumetric water content was corrected by taking into account the amount of stones in the soil profile.

The suction at the infiltration front, which is parameter P_{ini} in the CALHY model, was not measured. As several authors (Bader et al., 2010; Galbiati and Savi, 1995; Kidwell et al., 1997; Risse et al., 1994) showed that the matric suction P_{ini} has only a slight influence on the simulation of the rates and the amounts of infiltration and runoff compared to other parameters such as those caused by K_s , k and $\Delta\theta$, this parameter was computed as a function of the soil water content depletion with the relation obtained from data presented by (Bader et al., 2010).

2.5.Measurement of soil characteristics

Injected water discharge Q_i was measured at the canal that brought the irrigation water into the inlet of the field at the beginning of irrigation with a portable current-meter. The advanced runoff was determined for two irrigation events: the observed position of the runoff front was marked every 30 minutes by an operator walking along the field at 5 locations in the cross section of the flow direction with plastic sticks. At the end of the experiment, the position of each plastic stick was measured with a decameter and a GPS device. The precision of the measurements is evaluated at ± 2 m. Photographic monitoring was also conducted to analyze the vegetation development (data not shown).

The field data values of the CALHY parameters measured during each irrigation event in two locations are presented in Table (1).

	N	L (m)	W (m)	I (‰)	Q (l/s/m)	$\Delta\theta$ (m ³ /m ³)	Z (mm)	T _i (hr)	Date
1 st site	A1				2.85	0.070		7.16	10 days before 1 st cut
	A2				3	0.079		7.15	48 days before 2 nd cut
	A3		49	2.8	3.02	0.072	450	6.35	10 days after a 2 nd cut
	A4	410			2.28	0.072		9.5	21 days after a 2 nd cut
	A5				2.08	0.081		9.68	31 days after a 2 nd cut
2 nd site	B6		60	4.8	1.48	0.097	200	7.12	20 days after a 2 nd cut
	B7				1.65	0.103		6.45	39 days after a 2 nd cut

Table (1). Data sets for the monitored experimental irrigations. N is the label of the irrigation, L is the field length, W is the field width, I is the field slope, Q is the irrigation discharge per unit width of the field, $\Delta\theta$ is the soil water depletion, Z is the soil depth, T_i is the irrigation duration, Date is the date of the irrigation relative to the mowing date of the field.

2.6.Experimental data used for the fitting algorithm (“proxy-data”)

Several studies in soil and hydrology science showed that the confidence in a numerical model requiring parameter fitting increases when a large amount of experimental data are

used during the fitting process (Gillies and Smith, 2005; Moravejalahkami et al., 2009; Sedaghatdoost and Ebrahimian, 2015; Walker, 2005). However, it is very important to use independent data to avoid estimation errors resulting from their interdependence (Buis et al., 2011). Because of the autocorrelation of the measurements of the evolution of the water height in the upstream or downstream section in the field, we decided not to use the whole dataset in the inverse modeling approach. We extracted some key variables from this data set (see Fig (1)) that we called “proxy-variables”. These variables are:

- T_arrive (h) is the arrival time of the runoff front,
- T_submersion (h) is the duration of the submersion,
- H_max (mm) is the maximal value of the water height,
- H_integral (mm h) is defined as : $H_{integral} = \int_{t_{arrive}}^{t_{arrive}+t_{submersion}} H(t)dt$
- These variables were calculated for the two measurement sections.

2.7. The inversion modelling approach

Based on the SIMPLEX algorithm (Nelder and Mead, 1965), an inverse modeling approach was used to estimate parameters Ks , k , H_0 and $\Delta\theta$ of the CALHY model. The data used for the fit are the proxy-variables defined above. The objective function to be minimized was based on the weighted least squares method (Charnes et al., 1976), computed as follows:

$$objective_function = \sum_{j,k} \left[\frac{Obs_{j,k} - Sim_{j,k}(\theta)}{\sigma_j} \right]^2 \quad (42)$$

where j is the variable number, k is the variable position, Obs and Sim are the observed and simulated variable values, θ is the vector of the parameter values and σ_j^2 is the variance of Obs_j . The values of σ_j^2 for each proxy variable are given in Table (2) and identified from the experimental variance calculated from the three signals recorded at each position in situ for each variable of interest.

	Upstream measurement section				Downstream measurement section			
Proxy variables	T_arrive	T_submersion	H-max	H_integ	T_arrive	T_submersion	H-max	H_integ
σ_j^2	0.125	0.121	0.125	81	0.0125	0.25	0.25	36
	(h ²)	(h ²)	(mm ²)	(mm ² .h ²)	(h ²)	(h ²)	(mm ²)	(mm ² .h ²)

Table (2). The variance σ_j^2 used in the calculation of the objective function for each proxy variable at the two measurement sections in the field.

The optimization scheme is based on evaluating the objective function (OF) iteratively through successive values of the set of parameters θ . For the first iteration an initial set of parameters' values is sampled randomly inside a specified value range presented in Table (3). When the algorithm finds a new minimum OF , the parameter values are used for the following iterations.

The inversion algorithm stops for a given repetition when convergence is achieved or when the maximum number of iterations has been reached. Convergence is achieved when the difference between two successive estimations of OF is less than a predefined tolerance criterion.

This optimization scheme is repeated 20 times; each one starts with a new set of initial parameter values within their interval limit. The final value of the parameters is the one corresponding to the minimum value of the objective function between all the repetitions.

	$\log [K_S(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})]$	$k (\text{m}\cdot\text{s}^{-1/3})$	$\Delta\theta (\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	$H0 (\text{mm})$
Min	-7.2	1.5	0.06	0
Max	-5.6	4.5	0.12	20

Table (3): Boundary values of each parameter of interest. Initial values of each parameter are drawn within these boundary values at the beginning of the fitting process.

2.8.Validation of the estimated parameters

The validation of the proposed approach was performed in three successive steps summarized in Table (4): coherence and physical meaning of the fitted parameters, verification using the experiments used for the inverse modeling approach, validation performed using experiments not used for the inverse modeling approach and data from the literature.

Coherence and physical meaning of the fitted parameters:

- For a given field, the hydraulic conductivity at saturation, K_s , is constant over time. We therefore analyzed the variability of the value of K_s from one estimation to the other on each experimental site.
- The Manning-Strickler roughness coefficient k should be qualitatively related to the hay development and/or biomass: the more biomass there is, the more friction there is and the lower k is. Moreover the value of k should be less than the value for an agricultural bare soil; it should be maximum for an irrigation following the harvest of the field, and it should be minimum for the last irrigation just before the harvest. All the experiments used for the inverse modeling approach were used during this step.

Evaluation of the simulated hydrograph and runoff front on the situations used for calibration:

- We compared the estimated and the measured soil water depletion $\Delta\theta$;
- We compared the simulated and the measured hydrograph $H(t)$ in two cross sections of the field. Measured hydrographs are raw data that were not used directly during the inverse modeling approach. The reconstitution of the measured hydrographs was evaluated using the root mean square error RMSE (see eq. (10)) and the Nash-Sutcliffe criteria (see eq. (11)) which were computed as follows :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{S_i} - X_{O_i})^2}{n}} \quad (10)$$

where X_s and X_o are the simulated and observed data, i.e. the water height (mm) for the runoff hydrograph or the distance (m) in the advanced runoff curve.

$$C_{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Xs_i - Xo_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{Xo} - Xo_i)^2} \quad (11)$$

where \overline{Xo} is the mean of observed data.

- We compared the simulated and the measured advance of the runoff front during irrigation. The experimental data of the advance of the runoff front were not used during the inverse modeling approach, but they were obtained during the same irrigation.

All the experiments used for the inverse modeling approach were used during the comparison of $\Delta\theta$ and $H(t)$. The advance of the runoff front was measured during experimentation A5 only.

Evaluation of the simulated hydrograph and runoff front on situations not used for calibration:

- We simulated irrigation A4 that was not used during the inverse modeling approach. Parameters K_s , k , $H0$ and $\Delta\theta$ used for this direct simulation came from the parameters obtained from irrigation A5. The comparison between simulated and measured data was performed upon the advance of the runoff front and the hydrographs $H(t)$ at two sections of the field.
- Lastly, we simulated the experiments of (Mailhol and Merot, 2008) obtained on the first experimental site.
- Overall compared data for validation were also evaluated with RMSE and Nash criterion.

Experiment	Coherence of fitted parameters	Verification: experiments	Validation using additional
------------	--------------------------------	---------------------------	-----------------------------

	used for the inverse modelling	irrigation experiments
A1, A2, A3, A5 B6, B7	Stability of Ks from one experiment to the next. Relation between the hay development and the Manning-Strickler roughness coefficient k.	Measured/fitted $\Delta\theta$. Measured/simulated hydrograph H(t).
A5		Measured/simulated runoff advance curve.
A4		Simulation of runoff advanced curve and runoff hydrograph H(t) of A4 using the fitted parameters in A5.
A6, A7 (Mailhol and Merot, 2008)		Simulation of runoff advanced curve.

Table (4). The three steps of the validation strategy of the fitting process. Step one (“coherence”) is used to check the physical meaning of the fitted parameters; step two (“verification”) is a “weak validation” performed on data not used for the inverse modeling but obtained on the same experiments as those used for the inverse modeling approach; Step three (“validation”) is the validation *sensu stricto* performed on experiments not used during the inverse modeling approach.

3- Results and discussion

This section discusses the ability of the inversion system to predict the proxy variables identified for each irrigation event by fitting the parameters k , K_s , H_0 and $\Delta\theta$. These parameters were fitted for the irrigation events A1, A2, A3, A5, B6 and B7 and are listed in Table (5). The objective function and the variances in parameter estimation at each event are also presented in Table (6).

	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A5</i>	<i>B6</i>	<i>B7</i>
K_s (m s ⁻¹)	1.5E-06 (1.08–2.07)E-6	1.34E-06 (0.9–1.99)E-6	1.36E-06 (0.98–1.88)E-6	1.41E-06 (0.94–2.1)E-6	1.15E-07 (0.83–1.59)E-7	1.11E-07 (0.8–1.53)E-7
k (m s ^{-1/3})	2.94 (2.43–3.44)	2.61 (2.15–3.06)	3.54 (3.15–3.92)	2.53 (1.99–3.06)	1.69 (1.58–1.79)	1.65 (1.45–1.85)
$\Delta\theta$ (m ³ m ⁻³)	0.071 (0.05 – 0.09)	0.06 (0.04 – 0.08)	0.078 (0.06 – 0.09)	0.07 (0.05 – 0.09)	0.1 (0.08 – 0.12)	0.092 (0.07 – 0.11)
H_0 (mm)	0.3 (0 – 6.3)	1.9 (0 – 5.6)	2.6 (0 – 6.13)	4.2 (0 – 10.2)	3.3 (0 – 7.1)	2.6 (0 – 4.8)

Table (5): Irrigation parameters estimated for the different irrigations. Fitted values +/- one square root of the variance are given in brackets.

	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A5</i>	<i>B6</i>	<i>B7</i>
<i>Objective function value</i>	0.05	0.07	0.23	0.44	0.15	0.12
<i>Log [K_s (m s⁻¹)]</i>	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02
<i>k (m s^{-1/3})</i>	0.255	0.21	0.15	0.29	0.012	0.04
<i>Δθ (m³ m⁻³)</i>	0.0004	0.0004	0.0003	0.0004	0.0003	0.0004
<i>H₀ (mm)</i>	35.8	13.35	12.48	36.6	14.67	4.76

Table (6). Final values of the objective function obtained after convergence of the fitting process and variance of estimation for each parameter.

3.1. Convergence of the fitting algorithm

For all inversion procedures and all irrigation events, convergence of the fitting algorithm was achieved for more than 15 times over 20 repetitions. For the remaining repetitions, the algorithm stopped because the maximum number of iterations had been reached.

The OF values calculated for the first iteration ranged between 300 and 550, and decreased to 0.44 for irrigation A_5 and 0.05 for irrigation A_1 after convergence, see Table (6). Parameters K_s and k were always estimated with a low uncertainty, whereas the two remaining parameters $\Delta\theta$ and H_0 were estimated with a higher uncertainty.

3.2.Coherence and physical meaning of the fitted parameters

For a given experimental site, the fitted value of the hydraulic conductivity at saturation K_s did not change from one irrigation to another. For the first site, values of K_s ranged between $1.34 \cdot 10^{-6}$ and $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$. This parameter value varied within a very narrow range. An average value of $1.4 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ was calculated for this site, which is in accordance with the values obtained by Bader et al. (2010) and (Mailhol and Merot, 2008) on the same plot. For the second site, the two estimations of K_s were also close to each other, with an average value of $1.1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$, about one order of magnitude less than for the first experimental site, indicating that the soil of the second experimental site may be less permeable than the soil of the first site. This could be related to the soil characteristics of the second site which is hydromorphic and has a higher clay content and a higher organic content (Bouteyre and Duclos, 1994).

For both experimental sites, the estimated value of the Manning-Strickler roughness coefficient k ranged between 1.65 and $3.54 \text{ m s}^{-1/3}$. These values are less than the values of k for bare soils that can be found in the literature. For instance, (Harun-ur-Rashid, 1990) estimated a value of k close to $33 \text{ m s}^{-1/3}$ for bare soil. These values are comparable to values of k obtained for a cropped field irrigated by submersion. (Ree, 1949) cited by (Harun-ur-Rashid, 1990) indicated that the value of k could reach $1.7 \text{ m s}^{-1/3}$. (Bader et al., 2010), working on the same field and the same crop, calculated by inversion the value of k on 6

irrigations and found that k varied from 2.4 to 5.3 m s^{-1/3}. (Rasoulzadeh and Sepaskhah, 2003) assessed the variation of parameter k in furrows in different conditions and found that k ranged between 8 and 16 m s^{-1/3} and could increase by up to 30% when the vegetation increased by 47%. (Michael, 2009) suggested a value of $k=2.2$ m s^{-1/3} for the first irrigation of the season and 3.7 m s^{-1/3} for the following ones; (Davis et al., 1980) suggested a value of k ranging from 3.3 to 6.7 m s^{-1/3} for a field planted with alfalfa and irrigated with border irrigation. (Robertson et al., 2004) found that k varied from 2.8 to 5 m s^{-1/3} for a field sown with perennial pasture. In conclusion, our fitted values of k can be considered coherent with values found in the literature.

For the second site, the values of k were close to 1.65 m s^{-1/3}, which is significantly less than the values obtained on the first site. From a hydraulic point of view, the hydraulic friction of the flow increases as the discharge applied decreases (Rasoulzadeh and Sepaskhah, 2003); the field surface and vegetation stage in the second experimental site were close to those in the first one, but the applied discharges during the irrigations B6 and B7 were 50% lower than those applied in A1, A2 and A3 and 30% lower than in A4 and A5, which may explain the lower value of k .

For the parameter H_0 , it is difficult to assess the coherence of the estimation results due to the difficulty in measuring this parameter. The measurement of the soil surface storage, also named maximum depressional storage, is a very difficult task and this value is usually obtained from various soil roughness indices that are easier to measure on bare soils (Kamphorst et al., 2000). The simulated values of this parameter reported in (Kamphorst et al., 2000; Kamphorst and Duval, 2001) ranged from 0 mm to 30 mm and from 0.26 to 48.0 respectively. For a random soil roughness, the slope is expected to reduce the soil surface storage (Álvarez-Mozos et al., 2011), whereas the vegetation is expected to increase this value (Paz-Ferreiro et al., 2008). For our experimental conditions, the soil is very flat with a very smooth microrelief, as the soil was leveled several years ago and is never tilled. Therefore a

low value of H_0 is expected, which is the case. Despite the high uncertainty in the estimation of the value of H_0 , the fitted values ensured a good fitting of proxy variables for all irrigations.

3.3.Verification of the performance of the proposed approach for the parameters estimation

Fitted values and measured values of $\Delta\theta$ are compared on Fig. (3). We find a close relationship between measured and fitted data. The measured values were calculated as the average of three gravimetric profiles in the upstream section and three other gravimetric profiles in the downstream section of the plot.

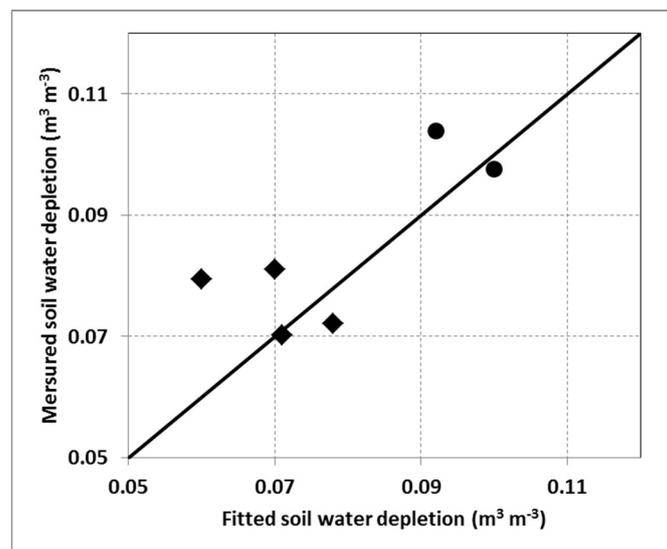


Figure (3) : Comparison between fitted (X-axis) and measured (Y-axis) soil water depletion in the two experimental sites and for all irrigations used during the fitting process. The continuous line is the 1:1 line, black diamonds are for the first site, black circles are for the second site.

The gravimetric water content was converted into volumetric water content using the measured bulk density and was corrected according to the stone content of the soil measured on two pits performed on an adjacent plot. Therefore the measured volumetric water content may not be representative of the average water content of the whole plot. This could explain the small discrepancy between measured and fitted values of water content. Nevertheless, the agreement is very good.

The comparison between the observed runoff hydrographs, which were monitored in situ in the upstream section and the downstream sections of the plot, and the simulated runoff hydrographs produced with the best fitted parameters after convergence of the fitting algorithm is presented in Fig (4). The estimated RMSEs and Nash criteria are presented in Table (7). The results show that the predicted and observed runoff hydrographs have a good agreement in all simulated cases. The Nash criterion was always higher than 0.85 in the upstream section and was close to 1.00 in the downstream section. The RMSE criteria in the upstream section were higher than those in the downstream section. In the upstream section of the plot, the maximum RMSE value was 10.12 mm for A2 whereas the lowest value was 3.6 mm in A1. In the downstream section of the plot, RMSE values were close to 3 mm for all irrigations.

Verification		A1	A2	A3	A5	B6	B7
C_{NASH} (-)	Upstream	0.99	0.85	0.86	0.89	0.85	0.96
	Downstream	0.97	1.00	0.98	0.94	0.98	0.94
RMSE (mm)	Upstream	3.63	10.12	8.18	10.29	8.61	4.13
	Downstream	3.78	1.57	3.41	4.63	3.55	4.74

Table (7): Values of the performance criteria calculated during the verification step of the fitting process. C_{NASH} is the Nash criterion. RMSE is the Root Mean Square Error between simulated and measured data.

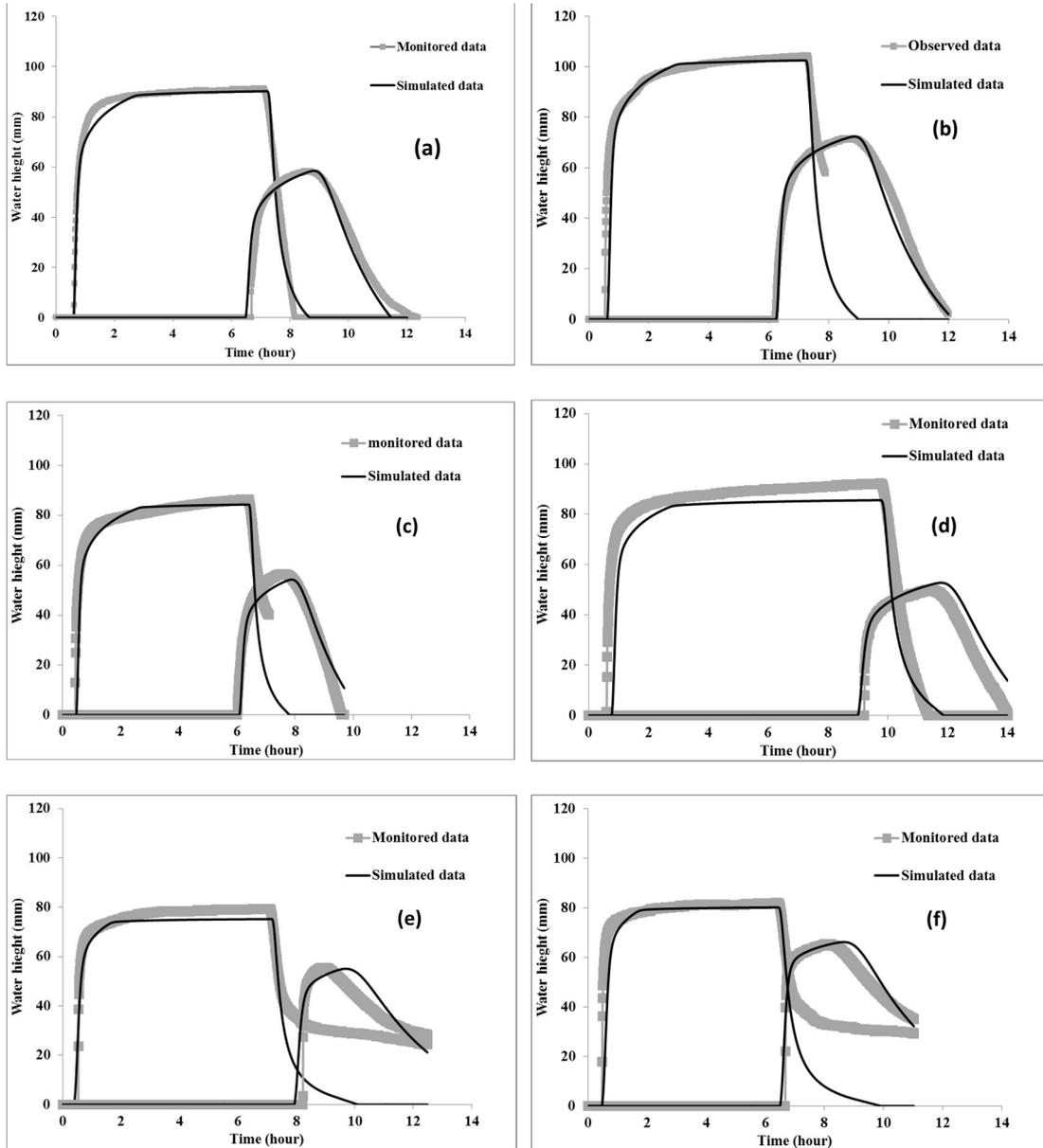


Figure (4). Comparison between measured and simulated runoff hydrographs in the upstream and downstream sections of the field. Simulations were performed with the fitted set of soil parameters. On each figure the first curve (on the left part of the X-axis) was obtained on the upstream section, whereas the second curve (on the right part of the X-axis) was obtained on the downstream section. (a) is for irrigation A1, (b) for irrigation A2, (c) for irrigation A3, (d) for irrigation A5, (e) for irrigation B6 and (f) for irrigation B7.

Likewise, Fig (5) shows good agreement between the advance curve monitored during the 5th irrigation and the advance curve simulated with fitted parameters in the same irrigation. The

Nash criterion was close to 1 and the RMSE value was close to 6 m, which is slightly higher than the experimental uncertainty on the measurement of the advance curve of the runoff front.

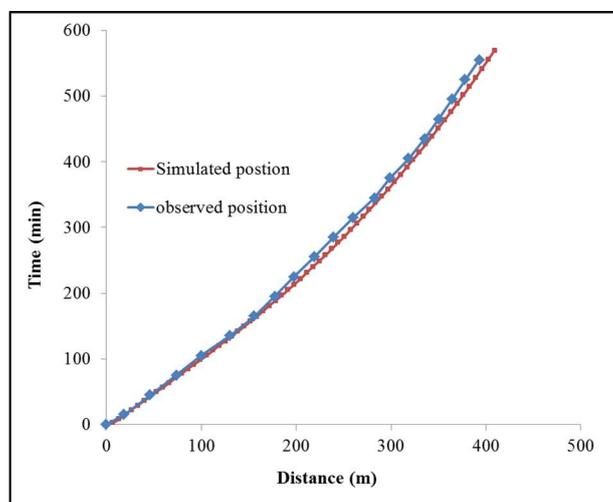


Figure (5). Comparison of measured and simulated advance curves of the runoff front for irrigation A5.

3.4. Validation of the new parameters' estimation approach

In order to validate the approach for the estimation of soil parameters, we used experimental data obtained by (Mailhol and Merot, 2008) and irrigation A4 from our dataset which was not used for the fitting procedure. The validation was performed on the comparison between simulated and measured advance curves of the runoff front at the plot surface for irrigation A4 and experimental data from (Mailhol and Merot, 2008), and it was also performed on the comparison between simulated and measured hydrographs for irrigation A4. The first irrigation from (Mailhol and Merot, 2008) occurred after the 1st mowing with a LAI about 1.3 m² m⁻². This irrigation is labelled irrigation A6. The development of the vegetation at the time of irrigation A6 was similar to the development of the vegetation during irrigation A3 in our dataset. Therefore, we used the parameters fitted on irrigation A3 to simulate irrigation A6.

The second irrigation from (Mailhol and Merot, 2008), labelled irrigation A7, occurred before the 2nd mowing: the development of the vegetation was maximum with a LAI about 7.7 m² m⁻². As these experimental conditions are similar to those of irrigation A2, we used the

parameters fitted on irrigation A2 to simulate irrigation A7. We used parameters fitted on irrigation A5 to simulate irrigation A4, as the experimental conditions observed during these two successive irrigations were very similar. All data are presented in Fig. (6) and Table (8).

Validation	Advance curve			Runoff hydrograph	
	A4	A6	A7	Upstream	Downstream
C_{NASH} (-)	1.00	1.00	1.00	0.90	0.95
RMSE	5.10	5.38	7.32	8.96	5.86

Table (8): Values of the performance criteria calculated during the validation step of the fitting process. C_{NASH} is the Nash criterion. RMSE is the Root Mean Square Error between simulated and measured data. RMSE units are m for the advance curve and mm for the hydrograph.

Table 8 shows that the simulated data are in very good agreement with the observed data. The Nash criterion C_{NASH} calculated with the advance curve data is close to 1 and it is higher than 0.9 when calculated with the hydrograph data. The RMSE value is about 6 m for the advance curve and between 6 mm and 9 mm for the hydrograph. The values of C_{NASH} and RMSE calculated for the validation experiments are very close to the ones calculated for the verification experiments, which validates our methodology for the estimation of both soil hydrodynamic parameters and soil surface hydraulic parameters.

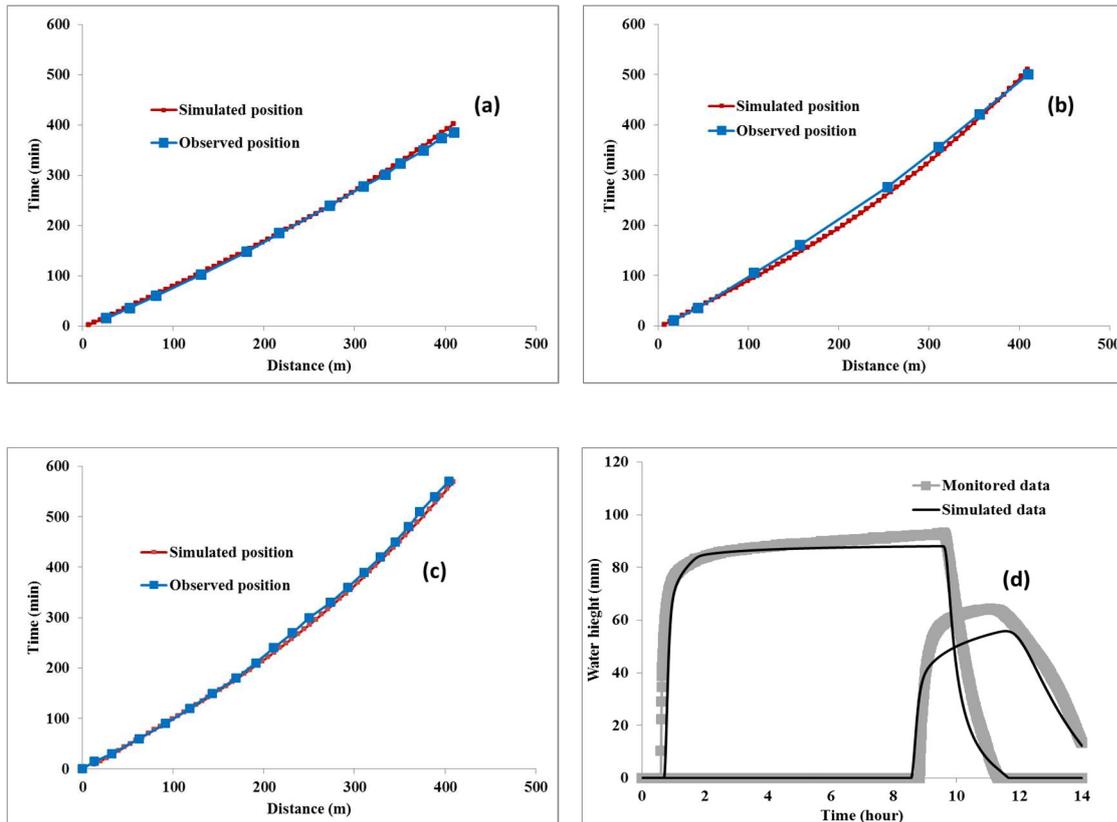


Figure (6): Validation step of the fitting process. Comparison of the simulated (red line) and measured (blue line and symbol) advance curves of the runoff front for irrigations studied by (Mailhol and Merot, 2008): (a) is for the 1st irrigation after the 1st mowing, (b) is for the last irrigation before the 2nd mowing; (c) is the comparison of the simulated and measured advance curves of the runoff front for irrigation A4; (d) is the comparison between simulated (black line) and measured (grey squares) runoff hydrographs in the upstream (first curve on the left) and downstream (second curve on the right) sections of the field during irrigation A4.

2. CONCLUSIONS

The main objective of this study was to develop a new method to estimate soil hydrodynamic parameters and soil surface hydraulic parameters at the field scale by combining inverse modeling and flooding irrigation experiments. The experimental procedure was based on the measurement of the hydrograph during flooding irrigation in two cross sections of the irrigated field, one section located in the upstream part of the plot and the other section

located in the downstream part of the plot. Some key variables, called “proxy variables” in this paper, were calculated from the hydrographs and were used in the inverse modelling approach. These variables comprised enough information to estimate the soil parameters with the inverse modelling approach.

The performance of the proposed method was evaluated in three steps. The first step was dedicated to checking the coherence of the fitted parameters for six different irrigation events. The second step was dedicated to verification of the inverse modelling approach. We used additional data not incorporated in the fitting process but obtained during the same irrigations as the ones used for the inverse modelling approach. Error criteria such as the Nash coefficient and the RMSE were calculated. Finally the validation step was carried out using observed data obtained during another irrigation experiment and two other irrigations monitored by (Mailhol and Merot, 2008). The same error criteria were calculated and were similar to the ones calculated during the verification step. To our knowledge and as far as surface irrigation is concerned, this is the first time that such a fitting process has been validated in three successive steps and with data obtained from other authors.

The results revealed that the proposed method is robust and effective in estimating the saturated hydraulic conductivity K_s and the Manning-Strickler roughness coefficient k with a high accuracy. The soil surface depressional storage coefficient H_0 was estimated with a large uncertainty, but this parameter has only a slight effect on the irrigation dynamic and the water balance at the field scale during one irrigation. The soil water depletion $\Delta\theta$ was estimated with a moderate uncertainty.

The proposed methodology proved to perform well in estimating the main soil parameters governing flooding during the irrigation process. These parameters can then be used in the CALHY runoff-infiltration model (Bader et al., 2010) first to analyze current irrigation

practices and then to propose ways of irrigation optimization in order to increase the water efficiency of surface irrigation systems and to help save water.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES :

- Álvarez-Mozos, J., Campo, M.Á., Giménez, R., Casalí, J., Leibar, U., 2011. Implications of scale, slope, tillage operation and direction in the estimation of surface depression storage. *Soil Tillage Res.* 111, 142–153. doi:10.1016/j.still.2010.09.004
- Amoah, J.K.O., Amatya, D.M., Nnaji, S., 2013. Quantifying watershed surface depression storage: determination and application in a hydrologic model. *Hydrol. Process.* 27, 2401–2413. doi:10.1002/hyp.9364
- Bader, J.C., Saos, J.L., Charron, F., 2010. Model of border irrigation runoff, advance and infiltration on a soil covering a very permeable subsoil. *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.* 55, 177–191. doi:10.1080/02626660903546050
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Schlegel, J., 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agric. Water Manag.* 96, 1146–1154. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.007
- Bautista, E., Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., 2012. Improved Surface Volume Estimates for Surface Irrigation Volume-Balance Calculations. *J. Irrig. Drain. Eng.-Asce* 138, 715–726. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000461
- Bouteyre, G., Duclos, G., 1994. Carte pédologique de la France à 1/100 000. Feuille Arles INRA.
- Bruinsma, J., 2009. The resource outlook to 2050, in: *Expert Meeting on How to Feed the World* in. pp. 1–33.
- S. Buis, D. Wallach, S. Guillaume, H. Varella, P. Lecharpentier, M. Launay, M. Guerif, J.E. Bergez, E. Justes, The STICS crop model and associated software for analysis, parameterization and evaluation. In: Ma, L.R.A.a.L. (Ed.), *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. Advances in Agricultural Systems Modeling 2*. Am. Soc. Agron., Crop Sc. Soc. Am., Soil Sc. Soc. Am., Madison, 2011, pp. 395-426.
- Charnes, A., Frome, E.L., Yu, P.-L., 1976. The equivalence of generalized least squares and maximum likelihood estimates in the exponential family. *J. Am. Stat. Assoc.* 71, 169–171.
- Clemmens, A.J., 2009. Errors in Surface Irrigation Evaluation from Incorrect Model Assumptions. *J. Irrig. Drain. Eng.-Asce* 135, 556–565. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000059
- Clemmens, A.J., Eisenhauer, D.E., Maheshwari, B.L., 1998. Infiltration and roughness equations for surface irrigation: How form influences estimation, in: *2001 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, p. 1.
- Davis, C.A., Collins, H.G., Portland, O.R., Woodward, G., Humpherys, A.S., Hart, W.E., 1980. Design and operation of farm irrigation systems. *Am. Soc. Agric. Eng. Mich. USA.*
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Ghanbarian-Alavijeh, B., Abbasi, F., 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrig. Sci.* 28, 479–488. doi:10.1007/s00271-010-0209-5
- Elliott, R.L., Walker, W.R., 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions [irrigation; Colorado]. *Trans. ASAE Am. Soc. Agric. Eng.*
- Elliott, R.L., Walker, W.R., Skogerboe, G.V., 1983. INFILTRATION PARAMETERS FROM FURROW IRRIGATION ADVANCE DATA. *Trans. Asae* 26, 1726–1731.
- FAO, 2016. AQUASTAT Main Database, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO, 2011. Irrigation areas, irrigated crops, environment.

- Galbiati, G., Savi, F., 1995. Evaluation of the comparative influence of soil hydraulic properties and roughness on overland flow at the local scale. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 183–190.
- Gillies, M.H., Smith, R.J., 2015. SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. *Irrig. Sci.* 33, 339–355.
- Gillies, M.H., Smith, R.J., 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrig. Sci.* 24, 25–35. doi:10.1007/s00271-005-0004-x
- Gillies, M.H., Smith, R.J., Raine, S.R., 2006. Accounting for temporal inflow variation in the inverse solution for infiltration in surface irrigation. *Irrig. Sci.* 25, 87–97. doi:10.1007/s00271-006-0037-9
- Harun-ur-Rashid, M., 1990. Estimation of Manning's roughness coefficient for basin and border irrigation. *Agric. Water Manag.* 18, 29–33.
- Kamphorst, E.C., Duval, Y., 2001. Validation of a numerical method to quantify depression storage by direct measurements on moulded surfaces. *Catena* 43, 1–14.
- Kamphorst, E.C., Jetten, V., Guérif, J., Iversen, B.V., Douglas, J.T., Paz, A., others, 2000. Predicting depressional storage from soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1749–1758.
- Kidwell, M.R., Weltz, M.A., Guertin, D.P., 1997. Estimation of Green-Ampt effective hydraulic conductivity for rangelands. *J. Range Manag.* 290–299.
- Lee, T.S., Walker, W.R., 1993. Evaluation of Infiltration in Furrow Irrigation Part 2: Basic Infiltration Rate. *Pertanika J. Sci. Technol.* 1, 119–124.
- Mailapalli, D.R., Wallender, W.W., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., 2008. Quick method for estimating furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134, 788–795.
- Mailhol, J.C., Merot, A., 2008. SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region. *Irrig. Sci.* 26, 289–302.
- Merot, A., Wery, J., Isberie, C., Charron, F., 2008b. Response of a plurispesific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *Eur. J. Agron.* 28, 8–18.
- Michael, A.M., 2009. *Irrigation: theory and practice*. Vikas Publishing House Pvt Ltd.
- Mohammed, G., Trolard, F., Bourrié, G., Gillon, M., Tronc, D., Charron, F., 2016. A Long-Term Data Sequence (1960-2013) to Analyse the Sustainability of Hay Quality in Irrigated Permanent Grasslands Under Climate Change. *Am. J. Agric. For.*
- Moravejalakhani, B., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpoor, M., Abbasi, F., 2009. Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. *Biosyst. Eng.* 103, 374–381. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.04.005
- Nelder, J.A., Mead, R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *Comput. J.* 7, 308–313. doi:10.1093/comjnl/7.4.308
- Paz-Ferreiro, J., Bertol, I., Vidal Vázquez, E., 2008. Quantification of tillage, plant cover, and cumulative rainfall effects on soil surface microrelief by statistical, geostatistical and fractal indices. *Nonlinear Process. Geophys.* 15, 575–590.
- Philip, J.R., 1969. Moisture equilibrium in the vertical in swelling soils. I. Basic theory. *Soil Res.* 7, 99–120.
- Rasoulzadeh, A., Sepaskhah, A.R., 2003. Scaled Infiltration Equations for Furrow Irrigation. *Biosyst. Eng.* 86, 375–383. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.07.004
- Ree, W.O., 1949. Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways. *Agric. Eng.* 30, 184–189.

- Risse, L.M., Nearing, M.A., Savabi, M.R., 1994. Determining the Green-Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model. *Trans. ASAE* 37, 411–418.
- Robertson, D., Wood, M., Wang, Q.J., 2004. Estimating hydraulic parameters for a surface irrigation model from field conditions. *Aust. J. Exp. Agric.* 44, 173–179. doi:10.1071/ea02191
- RomeGreen, W.H., Ampt, G.A., 1911. Studies on soil physics: I. The flow of air and water through soils. *J Agric Sci* 4, 124Jonckheere.
- Sedaghatdoost, A., Ebrahimian, H., 2015. Calibration of infiltration, roughness and longitudinal dispersivity coefficients in furrow fertigation using inverse modelling with a genetic algorithm. *Biosyst. Eng.* 136, 129–139.
- Shepard, J.S., Wallender, W.W., Hopmans, J.W., 1993. One-point method for estimating furrow infiltration. *Trans. ASAE USA*.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J.-M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F.T., 2010.
- Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1863–1880.
- Smith, R.E., 1972. The infiltration envelope: Results from a theoretical infiltrometer. *J. Hydrol.* 17, 1–22. doi:10.1016/0022-1694(72)90063-7
- Tiscareno-Lopez, M., Lopes, V.L., Stone, J.J., Lane, L.J., 1993. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications I: Hillslope processes. *Trans. ASAE* 36, 1659–1672.
- Valiantzas, J., 1993. Border Advance Using Improved Volume-Balance Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 119, 1006–1013. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:6(1006)
- Walker, W.R., 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131, 129–136.
- WANG, W., JIAO, X., PENG, S., MA, H., 2007. Linear regression approach for estimating soil infiltration parameters of border irrigation [J]. *J. Hydraul. Eng.* 4, 13.
- Weibo, N., Liangjun, F., Xiaoyi, M., 2012. Estimated Infiltration Parameters and Manning Roughness in Border Irrigation. *Irrig. Drain.* 61, 231–239. doi:10.1002/ird.624
- Wilson, C., 2007. Flow resistance models for flexible submerged vegetation. *J. Hydrol.* 342, 213–222.

3.3 Chapitre 3 : Utilisation D'un Modèle A Base Physique Pour L'Optimisation Multicritères De L'irrigation Des Prairies Par Submersion

La méthodologie d'estimation des paramètres de Calhy proposée et validée par les deux précédents chapitres permet d'estimer les quantités d'eau apportées et infiltrée à l'échelle d'une parcelle agricole. Cela permet d'utiliser notre modèle pour analyser ce système d'irrigation en fonction de caractéristiques telles que la dimension parcellaire et le mode d'injection de l'eau d'irrigation. Il peut aussi être utilisé pour optimiser le fonctionnement du système d'irrigation en étudiant des scénarios qui pourront être évalués selon différents critères : la consommation d'eau, la perte d'eau, l'homogénéité de la distribution de l'eau infiltrée, le temps du travail et le nombre de déplacement, le coût d'aménagement requis à faire.

Deux fonctionnalités ont été ajoutées au modèle Calhy dans la version Matlab permettant d'établir différents scénarios d'optimisation :

1. le critère d'arrêt de l'irrigation :

Ce critère a été défini d'abord en observant les irrigations lors des expérimentations d'irrigation. Nous avons observé que l'injection de l'eau d'irrigation est stoppée lorsque la lame d'eau atteint une certaine distance de l'extrémité de la parcelle (pourcentage de la longueur de la parcelle). L'eau continue à ruisseler pour irriguer la partie restante de la parcelle sous l'effet de la pente et du débit ruisselé. Trois objectifs doivent être satisfaits en appliquant ce critère;:

- minimiser le temps de travail ;
- minimiser l'eau perdue en aval des parcelles (« colature »).
- recharger totalement la RU des sols et mieux contrôler le drainage

Tous les scénarios étudiés sont établis en appliquant ce critère.

2. l'injection de l'eau dans la parcelle latéralement :

Tout ou partie du débit entrant dans la parcelle peut être injecté latéralement sur une certaine distance. Ceci permet de prendre en compte des configurations d'irrigation qui diffèrent de la configuration « standard ».

Cette modification a été effectuée en rajoutant un terme source à l'équation (19). Si un apport d'eau complémentaire, correspondant à un débit noté Q_l ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), est effectué sur la parcelle entre les abscisses x_i et x_j , alors l'équation (19) devient :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_{rl}}{\partial x} = q_l(x, t) - f \quad (43)$$

où $q_l(x, t)$ est le débit par unité de surface (m s^{-1}) injecté latéralement à l'abscisse x au temps t et définit par :

$$\begin{cases} q_l(x, t) = Q_l(t) / l \cdot (x_j - x_i) & \text{si } x \in [x_i, x_j] \\ q_l(x, t) = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où Q_l est le débit latéral ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) et l est la largeur de la parcelle.

Dans l'analyse qui suit, cinq scénarios d'optimisation ont été étudiés et évalués par rapport au mode classique de l'irrigation gravitaire.

1. Le scénario traditionnel : il est choisi comme un scénario de référence par rapport auquel on évalue les autres scénarios. L'eau est injectée en amont de la parcelle et va ensuite se propager dans la longueur vers l'aval. L'irrigation est arrêtée lorsque la lame d'eau arrive au pourcentage de la longueur prédéfinie par le critère d'arrêt.
2. Cassure de la pente : ce scénario a pour objectif d'homogénéiser la distribution instantanée de l'eau à la surface du sol, et donc d'homogénéiser l'infiltration et le drainage, en accélérant l'avancement de l'eau en amont et en la ralentissant en aval. Cela peut s'effectuer en augmentant la pente dans le premier tiers amont de la parcelle et en réduisant la pente dans les deux tiers restant. Ce scénario nécessite un nouveau nivellement de la parcelle mais ne modifie ni le temps de travail nécessaire à l'irrigation, ni les infrastructures hydrauliques d'amenée et d'évacuation de l'eau d'irrigation (filioles, martelières, colature).
3. Augmentation du nombre de points d'injection du débit d'irrigation : la totalité du débit d'irrigation est injecté successivement en deux points de la parcelle : en amont de la parcelle, puis en un point situé aux $\frac{3}{4}$ de la longueur totale. Ce scénario nécessite d'appliquer deux fois le critère d'arrêt : une première fois pour l'irrigation des $\frac{3}{4}$ amont de

la parcelle, une seconde fois pour l'irrigation du $\frac{1}{4}$ aval. Il permet donc de réduire la durée d'injection de l'eau d'irrigation. Il implique la création de nouvelles infrastructures hydrauliques. Le temps de travail nécessaire à l'irrigation augmente car l'injection d'eau est à réaliser en deux fois.

4. Augmentation du nombre de points d'injection du débit d'irrigation : ce scénario est une variante du scénario précédent, le second point d'injection étant situé à la moitié de la longueur totale de la parcelle et non aux $\frac{3}{4}$ de la longueur.
5. Fragmentation du débit d'irrigation : le débit d'irrigation total est fractionné en deux sous-débits égaux, les sous débits étant injectés simultanément en amont et à la moitié de la parcelle. Comme les scénarios 3 et 4, il implique la création de nouvelles infrastructures hydrauliques et la création d'un partiteur de débit, mais il n'augmente pas le temps de travail nécessaire à l'irrigation.
6. Changement de la pente de la parcelle permettant de passer d'une irrigation dans le sens de la longueur à une irrigation dans le sens de la largeur. La parcelle est divisée dans le sens de la longueur en N tronçons égaux, ce qui va créer N parcelles de plus petite taille. Chaque sous-parcelle est alors irriguée selon le scénario classique. Ce scénario implique un nivellement total de la parcelle, la création de nouvelles infrastructures hydrauliques, et une augmentation du temps de travail

Les scénarios proposés ont été étudiés afin de quantifier leur impact sur plusieurs critères :

1. le temps nécessaire pour irriguer,
 - a. 100 m de longueur de la parcelle (la vitesse d'avancement moyenne),
 - b. toute la longueur de la parcelle,
2. la dose d'irrigation injectée à la surface de la parcelle,
3. la quantité d'eau drainée,

puis ils ont été classés selon différents critères d'évaluation :

1. l'homogénéité de la distribution du drainage,
2. le temps d'arrosage,
3. le coût d'aménagement requis.

Ce chapitre a été présenté comme article de conférence à la Journée Scientifique de GFHN qui a eu lieu le 23/11/2015 à Marne-La-Vallée.

UTILISATION D'UN MODÈLE A BASE PHYSIQUE POUR L'OPTIMISATION MULTICRITÈRES DE L'IRRIGATION DES PRAIRIES PAR SUBMERSION

ALKASSEM ALOSMAN M. (1), RUY S.(1), OLIOSO A. (1), FLAMAIN F. (1),
LECHARPENTIER P. (1), BUIS S. (1), BADER J.C. (2), CHARRON F. (3), BELAUD
G. (3), BAILLIEUX A. (1, 4)

(1): INRA, UMR EMMAH, www.umr-emmah.fr

(2): IRD, UMR G-Eau, www.g-eau.net

(3) : SupAgro-M, UMR G-Eau, www.supagro.fr

(4) : SYMCRAU, www.symcrau.com

Résumé:

Dans la région de la Crau, les prairies permanentes bénéficiant d'une AOP « foin de Crau » sont irriguées de façon gravitaire par submersion, à partir d'eau prélevée dans la Durance. Ce système d'irrigation participe très majoritairement (entre 66% et 80% selon les estimations) à la recharge de la nappe souterraine, ressource importante pour l'eau potable, l'agriculture et l'industrie. Face à une possible pénurie d'eau pour l'agriculture à cause des changements climatiques ou des changements d'affectation de la ressource hydrique prélevée dans la Durance, des scénarios d'optimisation pour l'irrigation gravitaire des prairies ont été réalisés à l'aide d'un modèle à base physique (modèle CALHY, [7]) et ont été évalués selon différents critères (coût, consommation d'eau) afin de réduire les quantités d'eau apportées, minimiser le temps d'irrigation et améliorer l'homogénéité de la quantité d'eau drainée à l'échelle de la parcelle. Nous avons modélisé un critère d'arrêt de l'irrigation en fonction de la longueur de la parcelle. Ce critère a été appliqué à l'ensemble des scénarios testés. Un scénario optimal est identifié : l'injection successive du débit d'irrigation en deux points de la parcelle (en amont et à mi longueur) peut réduire de 50% les quantités d'eau apportées par rapport au mode traditionnel pour un faible coût d'aménagement.

Mots clés : irrigation gravitaire, prairie, Crau, modèle d'irrigation, scénario d'optimisation, drainage, infiltration, conductivité hydraulique à saturation, coefficient de Manning.

Abstract:

In the Crau region (southern of France), the permanent grassland benefitting of a Certified Origin Product (COP) « foin de Crau » are irrigated by flooding irrigation, with water taken

from the Durance river. This system of irrigation participates strongly to the recharge of the Crau aquifer (between 66% and 80% of the recharge depending on the estimations) which is an important resource for drinking water, agricultural water and water for industry. Facing a lower availability of water for agriculture because of climate change or allocation changes of the Durance water resource, optimization scenarios for the irrigation system were conducted using a physically based model (Calhy model, [7]). They were evaluated according to different criteria (cost, water consumption) in order to decrease the irrigation time and the amount of drained water and to improve its homogeneity at the plot scale. First we modeled a criterion to stop the irrigation depending on the plot length. This criterion was applied to all tested scenarios. An optimal scenario was identified: supplying water irrigation at two successive points of the plot (upstream and middle of the plot) could save around 50% of water compared to the traditional irrigation with a low cost of management.

Keys words: flooding irrigation, Crau, irrigation model, optimization scenario, drainage, infiltration, saturated hydraulic conductivity, Manning coefficient.

1. INTRODUCTION

L'irrigation gravitaire est un système traditionnel largement répandu au niveau mondial, reconnu comme étant fortement consommateur d'eau. Des volumes conséquents sont apportés à la parcelle, qui génèrent des flux d'eau importants aux limites de la parcelle (drainage, ruissellement en aval de la parcelle). Ces flux sont considérés comme des pertes à éviter bien que ces flux d'eau non utilisés sur la parcelle puissent générer des externalités positives (alimentation de zones humides, recharge de la nappe souterraine).

Dans la région de la Crau située dans le sud de la France, près de 14 000 ha de prairies permanentes sont arrosées par submersion. Le foin produit bénéficie d'une AOP indissociable du mode d'irrigation utilisé. L'eau utilisée est prélevée dans la Durance. À partir de la ville de Salon de Provence, plusieurs réseaux de canaux distribuent l'eau directement aux exploitations agricoles. Ils sont gérés par des Associations Syndicales Autorisées (ASA) qui contrôlent le respect des droits d'eau, des tours d'eau, les quantités utilisées par rapport la taille de l'exploitation [1] [2] [3] [4].

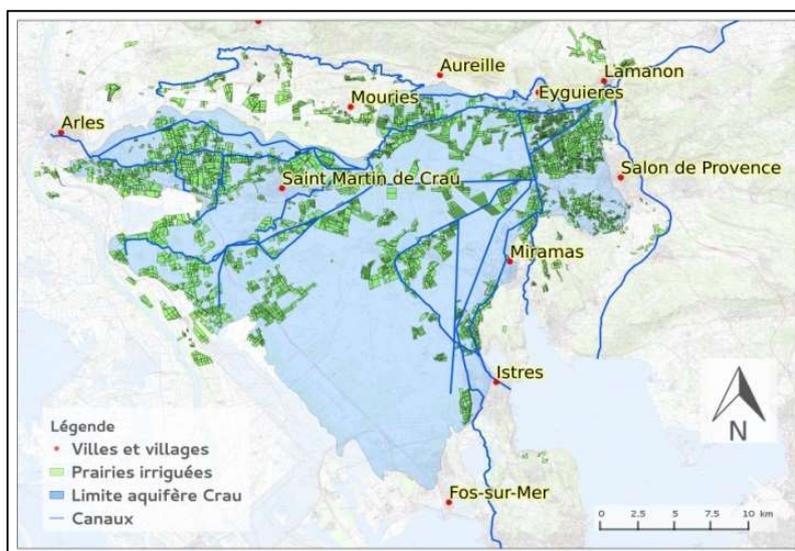


Figure 1 : la plaine de la Crau, la limite de la nappe souterraine, les prairies irrigués et le réseau des canaux principaux de distribution de l'eau d'irrigation aux exploitations agricole.

Dans ce système agricole, les quantités d'eau apportées en tête de parcelle sont très importantes, de l'ordre de 15000 à 20000 m³ ha⁻¹ an⁻¹ [6]. L'irrigation gravitaire participe majoritairement à la recharge de la nappe de la Crau, entre 66% et 80% selon les estimations [8], qui est considérée comme une importante ressource pour l'alimentation en eau potable

(250 000 habitants), pour alimenter des activités industrielles et enfin comme eau d'irrigation en particulier pour les autres productions agricoles [4] [5].

Ce système d'irrigation traditionnel peut être remis en cause dans le futur du fait d'une moindre disponibilité en eau dédiée à l'irrigation. Les changements climatiques futurs vont modifier le régime hydraulique de la Durance [1] [9], ce qui peut modifier les ressources disponibles.

Des changements d'affectation de la ressource hydrique de la Durance en direction d'autres systèmes d'activités (tourisme, production d'énergie) ou en vue d'augmenter la restitution au milieu naturel [10] peuvent être décidés. Des contraintes politiques et réglementaires peuvent également s'exercer sur les agriculteurs pour les inciter à diminuer les quantités d'eau utilisées [10]. Par ailleurs, une diminution trop importante des quantités d'eau drainées sous les prairies pourrait conduire à diminuer l'exploitabilité de l'aquifère. De plus, l'AOC foin de Crau rend actuellement obligatoire l'irrigation des parcelles par submersion [11].

Au niveau des exploitations, la tendance actuelle vise le regroupement et l'allongement des parcelles afin de limiter le temps de travail de l'arrosant, le coût de la main d'œuvre étant considéré comme un facteur important pour la durabilité économique des exploitations. Ces évolutions de la structure des exploitations peuvent impacter le bilan hydrique au niveau de la parcelle ou de la région, sans que cela soit clairement documenté.

L'objectif de ce travail est de tester différents scénarios de changement des pratiques d'irrigation à l'échelle de la parcelle et de quantifier, à l'aide d'une représentation mécaniste de l'irrigation gravitaire, leurs impacts sur plusieurs critères portant sur (i) le bilan hydrique et le temps d'irrigation à l'échelle de la parcelle, (ii) l'homogénéité du drainage, (iii) le nombre d'interventions de l'arrosant considéré comme un indicateur du temps de travail, (iv) une estimation qualitative du coût d'aménagement des infrastructures à réaliser.

2. MATERIELS ET METHODES

Le modèle d'irrigation

Nous avons utilisé un modèle d'infiltration ruissellement qui simule l'irrigation d'une parcelle par submersion. Il s'agit du modèle CALHY [7]. Ce modèle, basé sur l'approximation d'onde cinématique des équations de Saint Venant, utilise l'équation de Manning-Strickler pour décrire le ruissellement et l'équation de Green et Ampt pour décrire l'infiltration. Les

paramètres utilisés et les variables calculées sont décrits dans le tableau 1. Ce modèle a été testé et validé sur plusieurs parcelles expérimentales dans différentes conditions [12]. La figure 2 montre la capacité du modèle à reconstituer la dynamique de la lame d'eau en entrée et sortie de parcelle, après ajustement des paramètres.

Nous avons utilisé des paramètres hydrauliques et pédologiques moyens issus de nos expérimentations pour effectuer nos simulations (les valeurs sont données dans le tableau 2).

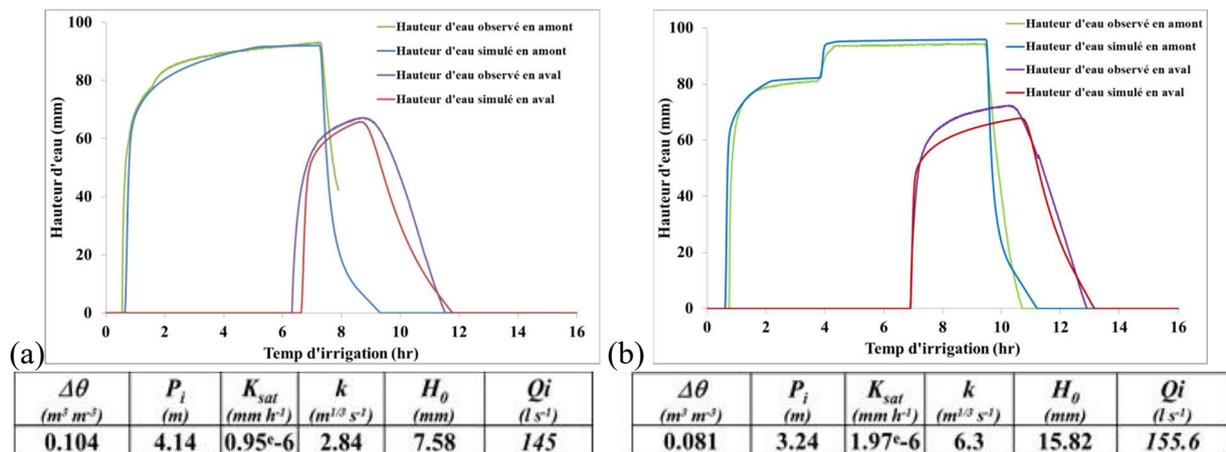


Figure 2 : Reconstitution de la dynamique de la lame d'eau en entrée et en sortie de parcelle avec Calhy, et estimation des paramètres pédologiques et hydrauliques pour 2 irrigations sur 2 différentes parcelles. a) la 2^{ème} irrigation au « DDM », 2) 1^{ère} irrigation au « Prise 7 ».

Détermination d'un critère d'arrêt de l'irrigation

Dans un premier temps, nous avons modélisé l'arrêt de l'irrigation en fonction de la longueur de la parcelle afin de définir une durée optimale d'irrigation afin (i) de remplir toute la réserve utile du sol sur toute la parcelle, (ii) de minimiser les quantités d'eau perdue par ruissellement en aval de la parcelle. Cette étude a été réalisée pour 3 valeurs différentes de la conductivité à saturation du sol K_{sat} qui correspondent aux gammes de valeurs trouvées sur le terrain. La durée optimale d'irrigation a alors été appliquée à tous les scénarios testés.

Les scénarios testés

Nous avons testé 6 scénarios que nous avons appliqués à des parcelles virtuelles de longueur croissante, le 1er scénario étant le scénario de référence correspondant aux pratiques actuelles. Le Tableau 3 décrit les différents scénarios utilisés.

Tableau 1 : Les différents paramètres du modèle Calhy nécessaires pour lancer une simulation et les variables de sortie générées par le modèle

<i>Les paramètres d'entrée</i>										<i>Les variables de sortie</i>			
$K_{sat} (m.s^{-1})$	$k (m^{1/3}.s^{-1})$	$\Delta\theta (m^3.m^{-3})$	$Z (mm)$	$P_i (m)$	$H_0 (mm)$	$Q_i (l. s^{-1})$	$L (m)$	$L (m)$	$I (\%)$	$f (mm s^{-1})$	$F (mm)$	$H (mm)$	$Q (m^3 m^{-1} s^{-1})$
Conductivité hydraulique à saturation	Coef friction hydraulique	Déficit de teneur en eau du sol	Epaisseur du sol	Potentielle succion	Eau retenue en surface du sol	Débit injectée	Longueur	Largeur	Pente	Flux d'infiltration	Infiltration cumulée	Hauteur d'eau à la surface du sol	Débit ruisselé par unité de largeur

Tableau 2 : valeurs moyennes des paramètres du Calhy utilisées pour réaliser les scénarios

$K_{sat} (m.s^{-1})$	$k (m^{1/3}.s^{-1})$	$\Delta\theta (m^3.m^{-3})$	$Z (mm)$	$P_i (m)$	$H_0 (mm)$	$Q_i (l. s^{-1})$	$L (m)$	$L (m)$	$I (\%)$
$2 \cdot 10^{-6}$	4	0.1	600	3	10	140	445	49	0.003

Tableau 3 : description des différents scénarios d'optimisation et évaluations de chacun d'eux selon différents critères (pour chaque critère les scénarios sont classés de 1 à 6 du meilleur au plus mauvais).

N°		scénario d'optimisation	Aménagement nécessaire	Drainage Homogénéité	Temps d'arrosage	Coût aménagement	Synthèse qualitative
1		Traditionnelle (Scénario de référence)	/	6	6	1	Moins bien
2		Augmentation de la pente sur le 1er tiers de la parcelle	Nivellement de la parcelle	4	5	4	Moins bien
3		2 points d'injection consécutifs (75% + 25%), Q_i	Construire un canal latéral	2	2	3	Mieux
4		2 points d'injection consécutifs (50% + 50%), Q_i	Construire un canal latéral	1	1	2	Mieux
5		2 points d'injection simultanés (50% + 50%), $Q_i/2$	Const. canal latéral+ Partiteur de débit	6	6	5	Moins bien
6		Changer les dimensions et la sens de la pente	Nivellement	2	3	6	bien

3. RESULTATS

3.1 Détermination du Critère d'arrêt de l'irrigation

Normalement l'arrêt de l'irrigation a lieu avant que la lame d'eau arrive au bout de la parcelle. En effet, l'inertie de la lame d'eau présente à la surface de la parcelle permet d'irriguer le bas de la parcelle. La durée optimale d'irrigation est très corrélée à la longueur de la parcelle. Elle est modulée par la valeur de K_{sat} , plus la conductivité du sol est faible plus le critère intervient rapidement (figure 3a), et par la valeur du déficit initial d'humidité du sol $\Delta\theta$, le critère augmentant lorsque la valeur de $\Delta\theta$ augmente (figure 3b).

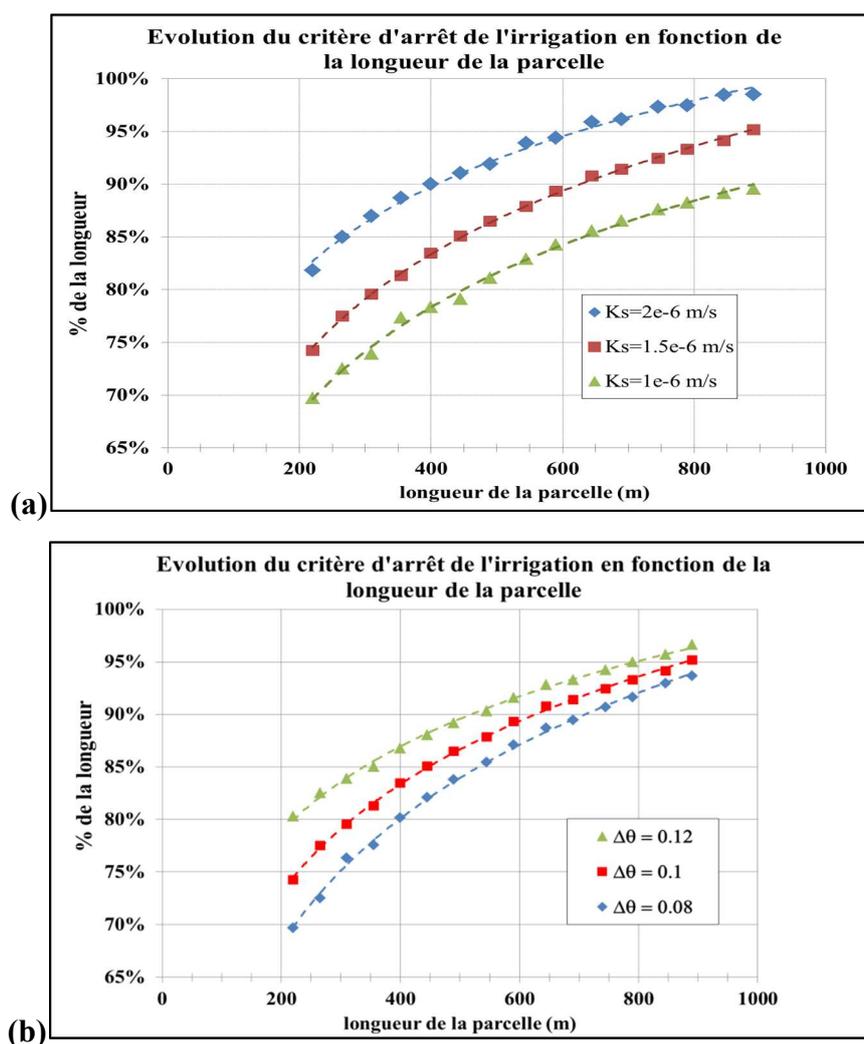


Figure 3 : modélisation du critère d'arrêt en fonction de la longueur de la parcelle pour trois valeurs différentes de K_{sat} (3a) et trois valeurs différentes de $\Delta\theta$ (3b).

3.2 Tests des scénarios

L'impact des scénarios a été quantifié selon plusieurs critères.

1. Le temps nécessaire pour irriguer toute la parcelle

Pour tous les scénarios testés cet indice augmente de façon très fortement non linéaire avec la longueur de la parcelle (figures 4a et 4b). En effet, la lame d'eau présente à la surface du sol durant l'irrigation à un instant donné diminue d'amont en aval du fait de l'infiltration dans le sol. Ainsi, la vitesse d'avancée de la lame d'eau qui dépend de la hauteur de celle-ci (équation de Manning-Strickler) va diminuer d'amont en aval : le temps nécessaire pour irriguer une longueur unitaire de parcelle est faible en amont de la parcelle et élevé en aval. Cette évolution sera d'autant plus marquée que la longueur de la parcelle est importante, ce qui explique l'allure des courbes présentées.

Les scénarios 2 (cassure de pente) et 5 (alimentation en eau de la parcelle en deux points simultanément avec partage du débit) sont très proches du scénario de référence : ils ne permettent pas un gain de la durée de l'irrigation. Inversement, les scénarios 3 et 4 d'une part (alimentation en deux points consécutivement) et le scénario 6 d'autre part (arrosage latéral de la parcelle) montrent un gain réel dans la durée d'irrigation, pouvant aller jusqu'à une diminution de plus de 50% par rapport au scénario de référence.

1.2.1 lame d'eau injectée figure (voir figure 5)

La valeur de la lame d'eau injectée se calcule comme le produit de la durée d'irrigation par le débit injecté rapporté à la surface de la parcelle. Les quantités injectées augmentent fortement avec la longueur de la parcelle quel que soit le scénario étudié. Pour le scénario de référence, la lame d'eau passe d'environ 120 mm pour irriguer une parcelle de 225 m de long, à 260 mm pour une longueur de 445 m et à plus de 500 mm pour une parcelle de 800m.

Comme pour le critère précédent, on peut distinguer deux groupes de scénarios : les scénarios 2 et 5 d'une part qui sont équivalents à la référence (scen. 1), les scénarios 3, 4 et 6 d'autre part qui se traduisent par une forte diminution de la dose injectée. Le scénario 4 est optimal sur ce critère, comme pour le critère précédent.

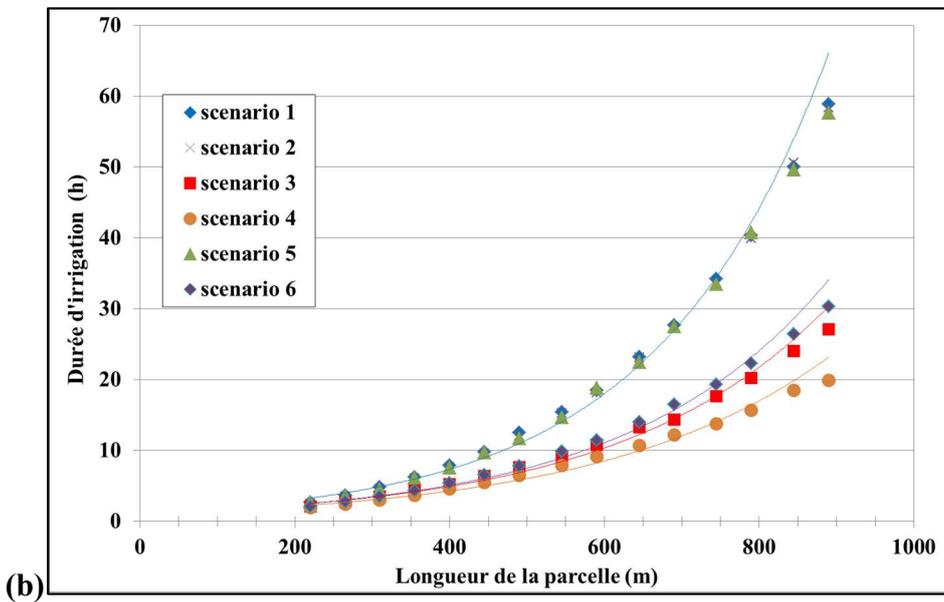
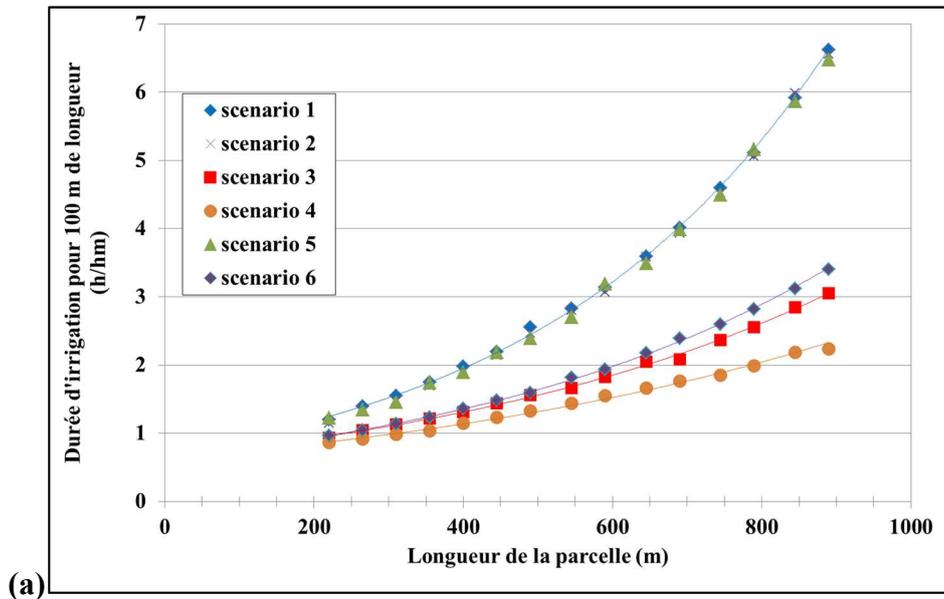


Figure 4 : évolution du temps d'irrigation selon les différents scénarios en fonction de la longueur de la parcelle. (4a) : temps nécessaire pour 100m de parcelle ; (4b) : temps nécessaire pour toute la parcelle

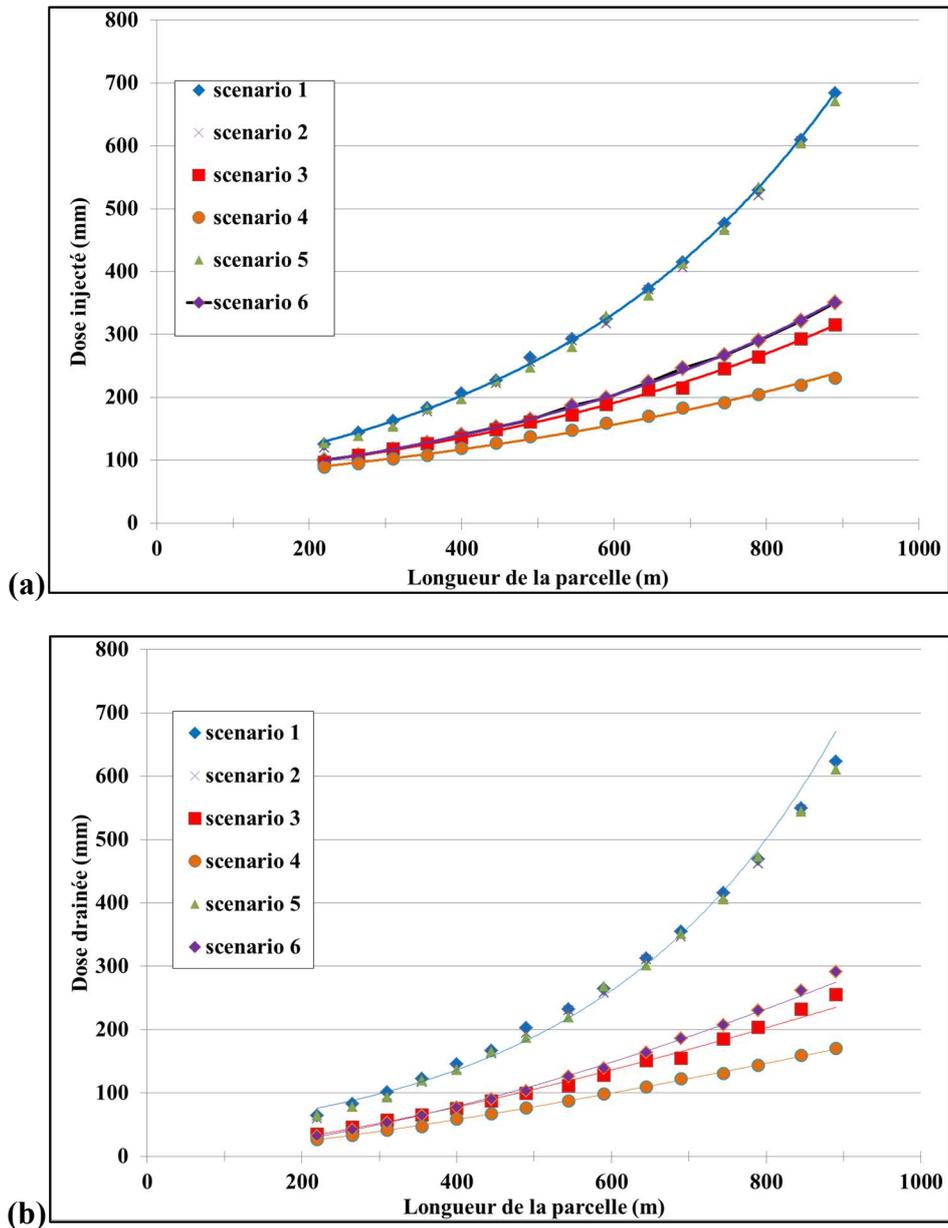


Figure 5 : (5a) Lamme d'eau injecté en fonction de la longueur de la parcelle selon les différents scénarios ; (5b) la lamme d'eau injecté et perdu en forme de drainage.

1.2.2 Quantité d'eau perdue sous forme de drainage

La quantité d'eau perdue sous forme de drainage est considérée globalement à l'échelle de la parcelle (voir figure 5b). Nous pouvons également caractériser son homogénéité intra-parcellaire (voir figure 6). A l'échelle globale de la parcelle, le classement des scénarios est similaire aux classements obtenus sur les deux critères précédents. Si l'on examine l'homogénéité intra parcellaire pour les scénarios 3, 4 et 5, on observe que le drainage le plus homogène correspond au scénario 4, qui est également le scénario optimal sur les autres critères. Inversement, le scénario 5 conduit à la plus forte hétérogénéité.

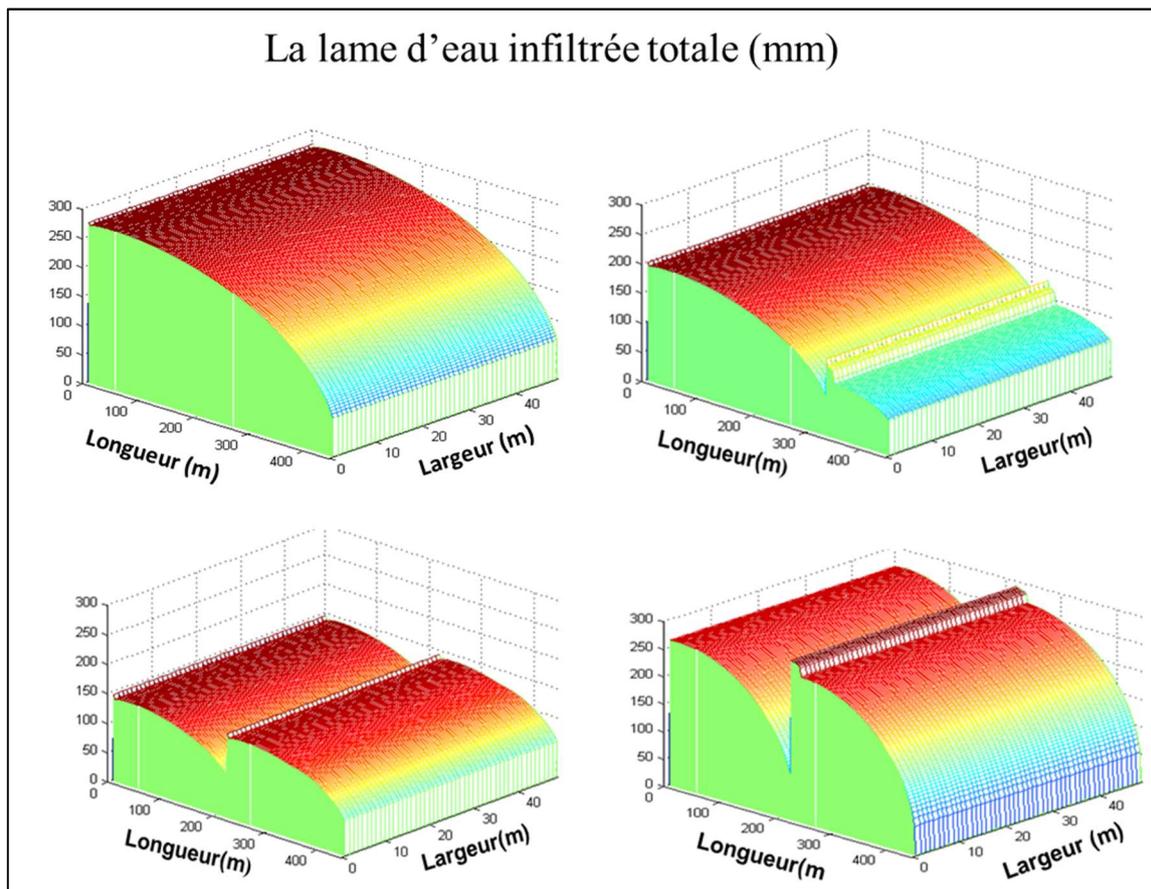


Figure 6 : illustration de l'homogénéité de la distribution de drainage sur toute la parcelle pour les scénarios 1, 3, 4 et 5.

3.3 L'évaluation des scénarios testés et la synthèse de travail

Dans le tableau 3, nous avons porté le classement des scénarios selon les différents critères évalués. Le scénario 4 (où l'eau d'irrigation est injectée consécutivement en amont et au milieu de la parcelle) est le scénario optimal sur les critères purement hydriques, il correspond à une légère augmentation du temps de travail et à des coûts d'évolution d'infrastructures qui sont estimés comme peu élevés, contrairement au scénario 6 qui nécessite un nivellement complet de la parcelle. Le scénario 1 (représentatif de l'état actuel) est fortement consommateur d'eau. Le scénario 2 qui suppose un nivellement complet de la parcelle afin de mettre en place une rupture de pente, n'impacte qu'à la marge les critères hydriques par rapport au scénario 1.

2. CONCLUSIONS

À l'aide d'un modèle à base physique qui simule la dynamique d'irrigation par submersion, nous avons défini et modélisé un critère d'arrêt qui optimise l'irrigation dans les pratiques

actuelles ou futures. Nous avons évalué l'impact de 6 scénarios d'irrigation gravitaire, ce système d'irrigation étant requis par l'AOP « foin de Crau ». La division de la parcelle en 2 parties et l'injection du débit consécutivement va réduire les quantités d'eau injectées jusqu'à 50% par rapport au scénario traditionnel. L'évaluation de l'impact de ces scénarios sur la ressource en eau souterraine à l'échelle de la Crau doit cependant être réalisée.

3. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - Oliosio A., Lecerf R., Baillieux A., Chanzy A., Ruget F., Banton O., Lecharpentier P., Trolard F., Cognard-Plancq A.-L. , 2013 - Modeling of drainage and hay production over the Crau aquifer for analyzing impact of global change on aquifer recharge. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 691–700
- [2] - Beltrando, G., (2015). Groundwater in the plain of the Crau (South- East of France): Between historical abundance and modern vulnerability. In Gâstescu P, Marszelewski W, Bretcan P (eds), Proceedings of the 2nd International Conference on Water Resources and Wetlands, 11-13 September 2014, Tulcea, Romania. ISSN: 2285-7923, Pages: 245-249.
- [3] - Mérot A., Bergez J.E., Wallach D., Duru M., Charron F., Capillon A., Wery J., Isberie C.,
Mailhol J.C., 2011 - Gestion de l'eau en Crau : comment s'adapter aux tensions sur la ressource en eau à l'échelle des exploitations agricoles. *Science Eaux et Territoires, Hors Série 2011, 2-7*
- [4] - Mailhol J.C., Merot A., 2008 - SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region. *Irrigation Science*, 26, 289–302
- [5] - Balland, P., Huet, P., Lafont, E., Leteurtois, J.P., Pierron, P., 2002 - Rapport sur la Durance:
Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance – Contribution à un Plan Durance. *Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère délégué à l'Industrie, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires Rurales, Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, Paris, 98 pp*
- [6] - Mérot A., Wery J., Isberie C., Charron F., 2007 - Response of multispecies grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *Eur J Agron*, 28, 1–8
- [7] - Bader J-C, Saos J-L, Charron F., 2010 - Modèle de ruissellement, avancement et infiltration
pour l'irrigation à la planche sur un sol recouvrant un sous-sol très perméable. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, 55, 177-191
- [8] - SYMCRAU (Syndicat Mixte d'Etude et de Gestion de la Nappe de la Crau), 2009 – Diagnostic qualitatif / quantitatif et analyse de l'évolution des risques sur la nappe de la Crau. *[Rapport de Synthèse] SYMCRAU, Istres, France. 81 pp*
- [9] - Oliosio A., Lecerf R., Chanzy A., Ruget F., Huard F., Rossello P. *et al.*, 2013 - Utilisation de

la ressource en eau et changement climatique. In: Tatin L, Wolff A (CEN PACA), editors. *La plaine de Crau: écologie et conservation d'une steppe méditerranéenne*, Paris, France: Edition Quae.

[10] – Le contrat de canal Crau-Sud-Alpilles <http://contratdecanalcrausudalpilles.overblog.com/>.

[11] – Décret du 23 septembre 1999 relatif à l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau »;

J.O n° 224 du 26 septembre 1999, p 14357, Art. 5.

[12] – M. Alkassem Alosman Et Al., 2015. Monitoring of flood irrigation for the characterization

of irrigation practices of grassland fields in the Crau region (south of France). *EGU2015-5982, Vienne (Autriche), 12-17/04/2015.*

3.4 Chapitre 4 : Caractérisation empirique de l'irrigation

Estimating irrigation dose over grassland borders using regression models with field dimensions and inflow rate

Les apports d'eau dus à l'utilisation de l'irrigation gravitaire dans la région de la Crau afin d'arroser les prairies sont mal connus, ce qui conduit à une mauvaise connaissance du cycle de l'eau dans cette région. Il n'existe pas de système de mesure de ces apports à la parcelle. Les quantités d'eau transférées vers la nappe sont également mal connues : les quantités d'eau d'irrigation drainées vers la nappe de la Crau sont estimées entre 60% à 80% de la dose appliquée, ce qui participe de 65% à 85% à la recharge hydrique de cette nappe.

La connaissance de la dose réelle appliquée dans ce système d'irrigation est le facteur déterminant pour modéliser l'irrigation et quantifier les comportements du bilan hydrique de la nappe de la Crau. De plus elle pourra contribuer à évaluer les effets des scénarios d'optimisation proposés visant à améliorer l'efficacité de ce système d'irrigation.

Le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif d'améliorer l'estimation des doses apportées par irrigation en cherchant des modèles empiriques de dose et durée d'irrigation, applicables au niveau de la parcelle et qui pourraient être régionalisés sur le territoire de la Crau.

Ces modèles sont ajustés en exploitant les relations entre la dose et la durée d'irrigation d'une part et d'autre part des paramètres caractérisant les conditions de l'irrigation à la parcelle tels que la géométrie parcellaire et le débit d'injection. Ces relations sont établies et testées en couplant les mesures expérimentales obtenues sur le terrain avec des enquêtes menées chez les producteurs de foin où l'irrigation gravitaire est appliquée.

Les résultats montrent que la surface et la longueur de la parcelle sont les principaux facteurs expliquant la durée et la dose de l'irrigation. La détermination de ces variables pourra être améliorée en intégrant ces facteurs avec d'autres facteurs comme la largeur de la parcelle et le débit injecté dans des régressions linéaires multiples.

Les modèles incluant le débit pour calculer la dose injectée, présentent une bonne performance par rapport à ceux qui ne le prennent pas en compte.

Estimating irrigation dose over grassland borders using regression models with field dimensions and inflow rate

Alkassem Alosman Mohamed, Ruy Stéphane, Flamain Fabrice, Lecharpentier Patrice, Olios Albert

1- Introduction:

Surface irrigation is a traditional irrigation system widely used worldwide. This system is recognized as being highly water consumer: high volumes of water are injected to surface plot, which generate significant loss of water by drainage and run-off. Although these unused water flows can generate positive externalities (feeding wetlands, groundwater recharge), a decrease of water volume used is sought in a context of limited water resource.

In the Crau region in southern France, the Durance River supplies the water used to irrigate the permanent grasslands which produce ‘Crau hay’, a high quality hay labeled as Certified Origin Product (COP). The area is characterized by shallow stony soils having a low water holding capacity, so that the grasslands often experience mild water stress between two irrigation events (Merot et al., 2008b). Annual average of hay yield ranges from 8 to 10 tons by hectare. Information on the Crau area and irrigated hay production can be found in (Beltrando, 2015b; Mailhol and Mérot, 2008; Mérot et al., 2011; Mérot et al., 2008; Olios et al., 2013b). In this area, border irrigation started during the XVIth century. It consists today in the submersion of the grassland fields with high quantities of water from March to October (up to 25000 m³ ha⁻¹ year⁻¹). This water is distributed in 10 to 20 times according to rotational turns defined by irrigation associations in charge of the management of the main surface channels (ASA: in French “Associations Syndicales Autorisées” which literally translates to Authorized Union Association). At the farm level, small surface channels provide water at one side of the field for the time required for the water to reach the opposite side. For a typical field, 450 m length, about 8 hours are required for ensuring that irrigation is completed. If the water flow is left running for too long, water may run off the end of the field. Even if the irrigation stops before in order to avoid run-off loss, a large part of the water infiltrates into

the soil and is drained toward the Crau aquifer. In the Crau area, previous studies showed that 60% or more (up to 80%) of the applied water were lost through percolation toward the aquifer (Merot et al., 2008b; Oliosio et al., 2013a; SAOS et al., 2006). The contribution of irrigated water to the aquifer recharge was estimated between 65 and 85 % (Gillon et al., 2015; Oliosio et al., 2013a; Seraphin et al., 2015). High level of aquifer recharge in irrigated area was also found in other aquifers in the lower basin of the Durance River (Clémentz, 1999; Lacroix, 1991; Nofal et al., 2015) or in other part of the World; e.g. (Qin et al., 2011).

The Crau aquifer has an important role as the main source of drinking water for around 300,000 inhabitants in the area and as it aliments several industrial and agricultural activities (Baillieux et al., 2015; Guérin et al., 2009). Moreover, the irrigation system and the aquifer contribute to the equilibrium of several ecosystems including tree hedges and wet lands (Balland et al., 2002). Despite these positive externalities, interrogations on the efficiency of grassland irrigation have been raised recently due to an increase in the frequency of water restriction for irrigation use (Baillieux et al., 2015; MEROT et al., 2011; Oliosio et al., 2013b; SOGREAH, 2010).

Actually, the availability of water for irrigation is threatened for the next future because of the double pressure of climate change and evolution of water use by other sectors. Water shortage periods might increase from one out of 15 years in recent years to one out of four in the 2035-2065 period (Baillieux et al., 2015). Future change in the distribution of precipitation in the Durance watershed, while environmental issues such as the conservation of the river stream in summer, and water use increase related to demographic and economic development (electricity production, domestic water use, recreational use of water ...) might limit the availability of water for irrigation.

At the farm level, the possible increases in the price of water and in the cost of manpower for irrigation activities are also significant when evaluating the future of irrigation. In the Crau

area, it is clear that the issue of labor cost is highly significant since almost all operations are done manually and are very time consuming. Moreover, irrigation schedules often infringe conventional regulations of work schedule. For the last twenty years, in order to reduce manpower cost, a strong tendency to increase the length of the irrigated plots has been noticed (but still not documented). The increase in plot length reduces labor as less water gates are required for diverting water from channels to the border. However, this may be in disagreement with the objective of improving irrigation efficiency since a common thinking is that a larger plot length results in an increase in the irrigation dose by unit of area. This was demonstrated in the Crau conditions by (Bader et al., 2010; Mailhol and Merot, 2008) using hydraulic models simulating water flow in border irrigation processes. They showed that doubling the border length (from ~200 m to ~400 m) may result in increasing the applied dose by 20% or more (in particular when water discharge was low). However, these studies focused on synthetic scenarios for a very limited number of situations and are difficult to generalize since restructuration of borders is not consisting in a simple change in the geometry of the border but is also associated with modifications of the field surface, levelling and vegetation implantation. Moreover, an accurate use of irrigation model relies on the availability of accurate value of model parameters such as Manning's roughness coefficient and infiltration coefficients which are not commonly available (Khanna and Malano, 2006).

Surprisingly, while irrigation of grasslands has a central role in the water cycle of the Crau area, only little is known on the quantity of water which is really used. There is no monitoring of the water used by farmers, the only available information being the water right for each farm. As a consequence, the water balance of the aquifer and the quantitative contribution of irrigation are very uncertain. For example, the amount of water drained annually toward the aquifer was estimated in a very large range between 100 hm³ and 240 hm³ which represented between 20% and 40% of the total aquifer volume (Guérin et al., 2009; Oliosio et al., 2013b; Seraphin et al., 2015).

In these conditions, it is very difficult to evaluate the possible impacts of future evolutions of water availability and of irrigation practices on the water balance of the Crau aquifer and to propose adaptations of irrigation management practices to a decrease in water availability while preserving irrigation externalities.

In this article we analyze the relation between the dose applied to borders and geometrical characteristics of the borders and the water inflow rate. We derive regression models to compute irrigation duration and applied dose from these characteristics. In a second step we investigate the possibility to use the regression model for analyzing the evolution of the amount of water applied to irrigation blocks (group of borders) in relation to the evolution of their spatial structure. We also try to validate or invalidate the two following hypothesis and we discuss the ability of the model to catch these behaviors :

- there is a strong relation between the applied dose and the border length
- increasing the size of the border increases the applied dose by surface unit

2- Material and methods

2.1- The study area

This work was carried out in the Crau plain, southeastern France (centered approximately at 43°35' N, 4°50' E). It is a 642 km² flat territory delimited by the towns of Arles, Salon-de-Provence and Fos-sur-Mer and bordered naturally at the East by the Berre Lake, at the West by the Rhone River, at the North by the Alpilles Mountains and at the South by the Mediterranean Sea (Figure 1).

The plain of Crau has a Mediterranean climate characterized by hot and dry summers and mild winters. Rainfall on average is around 550 mm per year, but it is irregular and ranges from 350 to 800 mm. A dry period can be observed from June to September, a wet season from October to December, a relatively dry period from February to March, and a relatively wet season from March to April, confirming the character of the Mediterranean climate. The climate in Crau is also characterized by frequent strong and dry wind, the mistral, which blows around 100 days per year with speed higher than 5 m s⁻¹.

The main soil is a calcic luvisol (FAO-UNESCO, 1981) corresponding to the old alluvial bed of the Durance. Its thickness varies from 0.2 m to 1 m, creating heterogeneity regarding water stress for hay in summer. In irrigated areas, it is topped by a layer of silt brought by irrigation water. Depending on the age of the irrigation system, the depth of the silt layer varies between few centimeters (youngest fields) to 1 m (oldest fields).

The main agricultural production systems in the Crau area include sheep breeding, cereals, orchards, vegetables (a large proportion in greenhouses), olive trees (for oil) and hay production. Irrigated grasslands occupy around 13 500 ha, 8500 of which classified as Certified Origin Product. This production system is quite exclusive, as only 13% of the farms produce hay and fruits or cereals. However, sheep breeding is associated with hay production in 37%

of the farms (Merot et al., 2008a). In winter, sheep are usually grazing grassland, while in spring-summer hay is harvested three times.

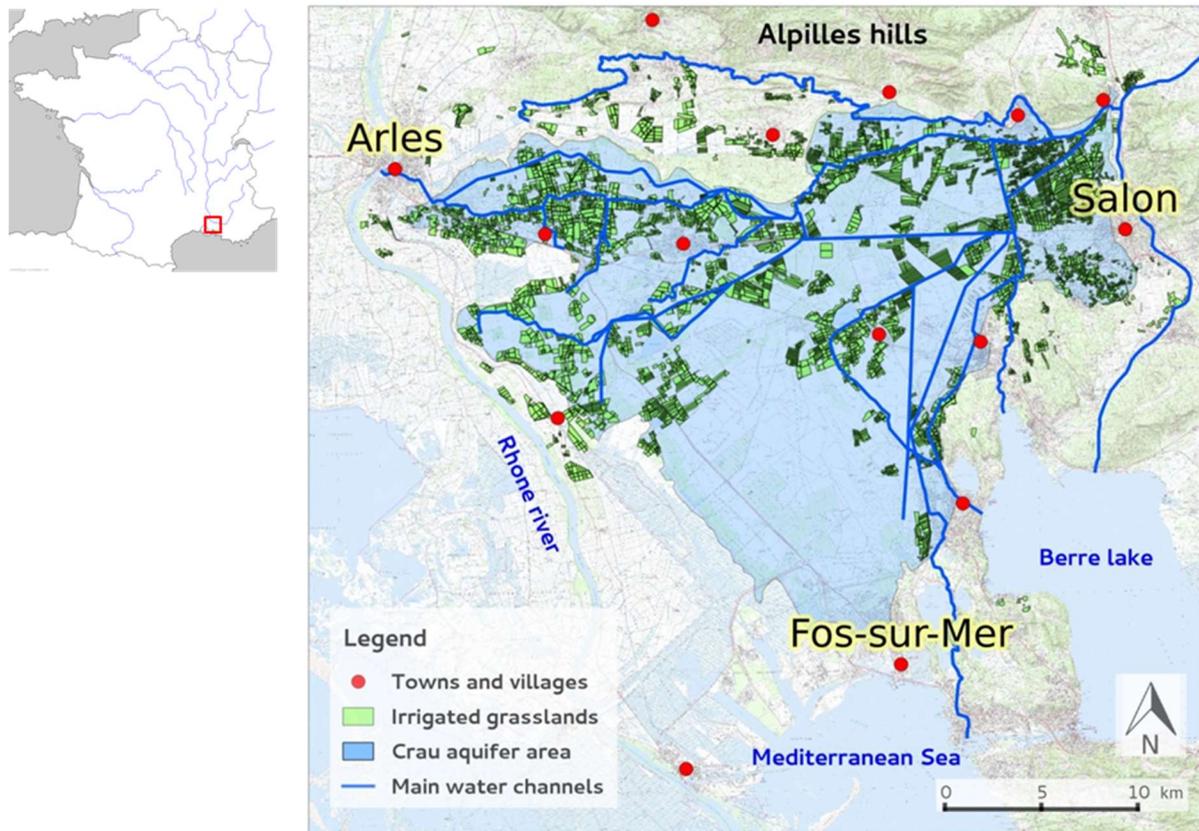


Figure 1: Map of the Crau area showing the aquifer limits, the irrigated grassland areas and the main surface water channels.

2.2- Irrigation system in the Crau area

Different irrigation systems are in use within the Crau area. These include drip and aspersion techniques, mainly for orchards and vegetable, but the most widely used system is based on a traditional border irrigation technique which consists in completely flooding the fields. Field surface is bordered, from upstream to downstream following field slope, with water brought in from small channels. Most of this water is distributed from the Durance River to the farms thanks to a network of primary and secondary surface canals (Figure 1). The distribution of water to the farms and then to the fields is done according to rotational turns and water allocations that are determined by the local irrigation associations (ASA). Depending on the ASA, distribution turns range between 7 and 12 days. The schedules were established

historically on the basis of $0.0012 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ s}^{-1}$ considering a continuous flow over the year and have remained almost the same for several centuries (Beltrando, 2015b; Peyre, 1927). Thus, at the farm level, access to water (amount, duration, frequency) is predetermined and it is not really possible to regulate the water supply according to crop requirements. In some farms, in order to improve water availability, part of the irrigation water is withdrawn from the aquifer. Depending on the soil depth, turn length has a significative impact on hay yield, with a loss of 0.1 t ha^{-1} for an increase of 2 days (MEROT et al., 2011). The infrastructure of the irrigation system is also very rigid as it requires a large network of small channels and gates for providing water to each field. Each border was also leveled for ensuring a correct flooding. All these features imply strong constraints on any modifications of the irrigation system.

2.3- Strategy of work

This study was based on three datasets:

1. A series of surveys was performed with hay producers in order to document the general characteristics of irrigated grassland fields including information on field geometry and irrigation characteristics (allocated discharge, usual irrigation duration for each field...).
2. Another series of surveys was more specifically dedicated to document the evolutions of the water use and the evolution of the spatial structure of irrigation blocks (composed of several fields) at different dates in the last 30 years.
3. Irrigation monitoring experiments were performed in order to measure irrigation duration and applied discharge for some irrigation events; these experiments were carried out on a set of hay fields from the exploitations where surveys took place.

The first series of surveys was used to develop models of irrigation duration and irrigation dose as a function of field and irrigation characteristics. Several regression models were derived based on an increasing number of explicative variables. Two main variables were computed: *-i*) the irrigation duration (T_i) which is an important factor for the setting of the

water distribution turns and for the organisation of labour in the farm, and **-ii)** the irrigation dose (***Di***) which is the basis for computing the amount of water used over the field, the farm and eventually the Crau area. We assumed that the farmers were able to give us accurate information on the irrigation duration as this information is the main driver of labour planning at the farm scale. Indeed, labour for the management of irrigation is one of the main production costs for hay production in the area, so that it receives a lot of attention by the farmers.

The experimental dataset was used to evaluate the derived models by comparing estimated dose and duration to the values measured during the monitoring experiment. The second series of surveys was used in the last step of the study, for evaluating the evolution of the water amount used while irrigation block structure was changing in time.

2.4- Surveys of farm structure and irrigation practices

Surveys were performed using a direct interview with hay producers in Crau region on the following items:

- General presentation and history of their exploitation.
- Design of the fields (field dimensions, slope, soil depth...) and the technical itinerary for irrigation and others operations. Field dimensions were checked using the French national geographic system (geoportail: <http://geoportail.fr/>)
- Water management from field scale to exploitation scale. At field scale: irrigation flow, irrigation duration and submersion mode. At the exploitation scale: allocated water (theoretic discharge from ASA) and water distribution turn.

The theoretical irrigation doses ***Di*** (m³) injected to the borders were computed as the product of the stated duration ***Ti*** (s) by the farmers by the theoretical discharge ***Qi*** (m³s⁻¹):

$$\mathbf{Di} = \mathbf{Ti} \times \mathbf{Qi} \quad \dots (1a)$$

2.4-1. Individual field data

Surveys were first performed over a set of 69 borders among 14 farms all around the Crau area and in a second step for 3 irrigation blocks for which information on border structure was available at different date in the last 30 years.

Figure 2 presents the diversity of borders in length, width, surface and allocated discharge in the first series of surveys. Border lengths (L) ranged from 62-730 m but more than 60% were between 100-250m. Border widths (W) ranged between 20 m and 125 m with an average close to 50 m. Border surfaces (S) ranged between 0.2 and 4.8 ha with a large majority between 0.5 and 2 ha. The discharge allocated by ASA presented two main regimes around $0.12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The largest value was mainly allocated for the irrigation of long borders which required a high discharge in order to achieve the submersion of the full surface of the border.

2.4-2. Block data

Block data at two sites in the study area were obtained from the farmer surveys in combination with the field limits from GIS layer and aerial photographs. In order to assess the evolution of water use, the evolution of field structure and surface was derived using aerial photographs at different dates obtained from the IGN (Institut Geographique National) web site (<http://geoportail.fr/>). This site offers the possibility to download photographs up to the mid XXth century. For these blocks, farmers provided an estimation of duration of irrigation, which permitted to compute the applied dose thanks to Eq. 1 (Table 1). Figure 3 presents the evolution of the structure of the two blocks.

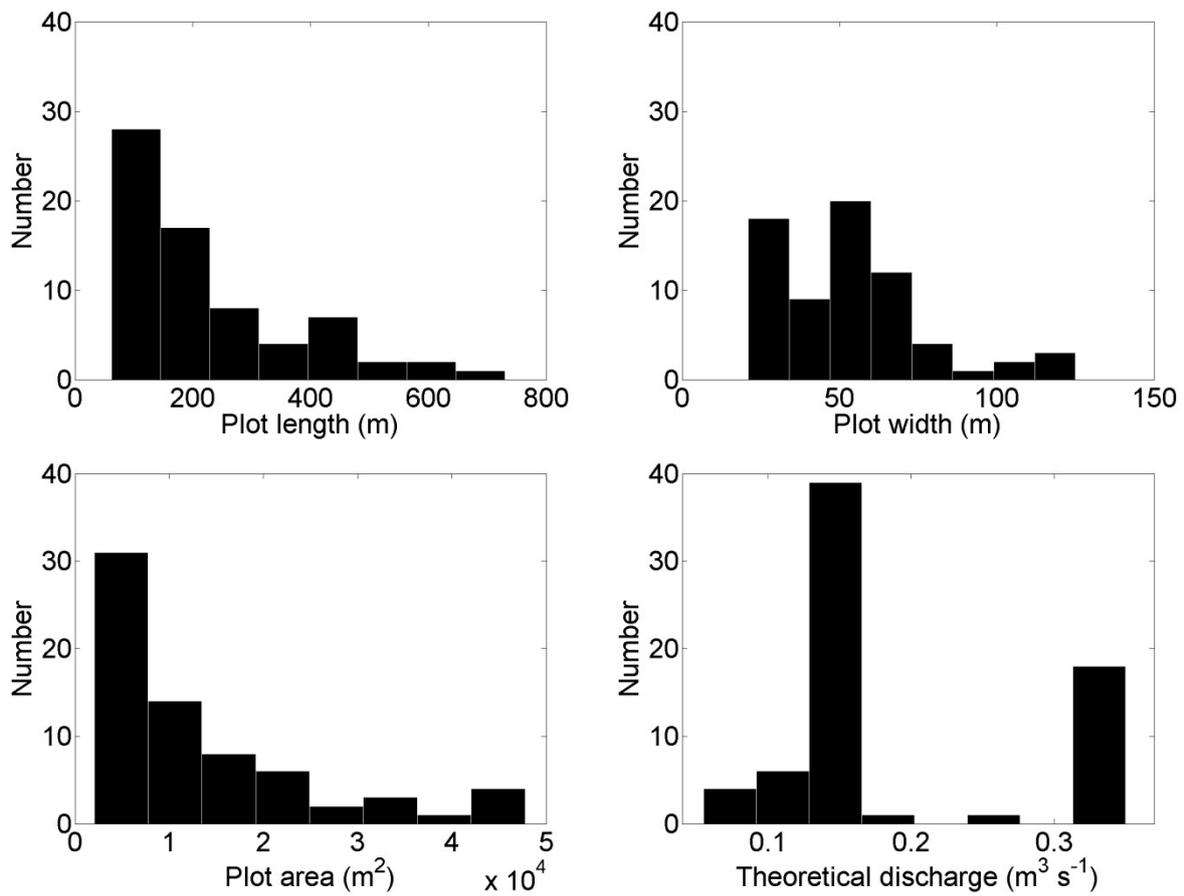


Figure 2: Histograms of the main characteristics of the 69 investigated borders in the first survey dataset: length L , width W , surface S and theoretical water discharge Q_i (i.e. allocated discharge by ASA).

Table 1: Characteristics of the blocks (number of borders, areas, irrigation dose) and their evolutions through time.

Block 1

Year	1990		2006		2012	
Number of borders	94		17		10	
Water discharge	$0.35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$		$0.35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$		$0.35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	
Quarter	Area (m^2)	Dose (m^3)	Area (m^2)	Dose (m^3)	Area (m^2)	Dose (m^3)
Q1	6×2436 15×2900	$1.72 \cdot 10^4$	4×14500	$1.01 \cdot 10^4$	4×14500	$1.01 \cdot 10^4$
Q2	6×2436 15×2900	$1.72 \cdot 10^4$	2×29000	$1.26 \cdot 10^4$	2×29000	$1.26 \cdot 10^4$
Q3	6×2436 15×2900	$1.72 \cdot 10^4$	2×29000	$1.39 \cdot 10^4$	2×47750	$2.58 \cdot 10^4$
Q4	6×6300	$0.76 \cdot 10^4$	6×6300	$0.76 \cdot 10^4$		
Q5	8×3480	$0.67 \cdot 10^4$	1×27840	$0.88 \cdot 10^4$	1×55680	$1.64 \cdot 10^4$
Q6	8×3480	$0.67 \cdot 10^4$	1×27840	$0.88 \cdot 10^4$		
Q7	1×1160 2×2900 4×3480 2×4230	$0.76 \cdot 10^4$	1×34800	$0.76 \cdot 10^4$	1×34800	$0.76 \cdot 10^4$
Total	297168	$8.02 \cdot 10^4$	302280	$6.93 \cdot 10^4$	301980	$7.25 \cdot 10^4$

Block 2

Year	2003		2014	
Number of borders	8		4	
Water discharge	$0.35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$		$0.35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	
Quarter	Area (m^2)	Dose (m^3)	Area (m^2)	Dose (m^3)
Q1	$2.46 \cdot 10^4$	7560	$4.29 \cdot 10^4$	12600
	$1.81 \cdot 10^4$	6300		
Q2	$2.10 \cdot 10^4$	5040	$3.95 \cdot 10^4$	10080
	$1.84 \cdot 10^4$	5040		
Q3	$1.86 \cdot 10^4$	3780	$3.92 \cdot 10^4$	7560
	$2.04 \cdot 10^4$	4410		
Q4	$1.39 \cdot 10^4$	2520	$3.19 \cdot 10^4$	5040
	$1.78 \cdot 10^4$	3465		
Total	$15.29 \cdot 10^4$	38115	$15.34 \cdot 10^4$	35280

2.5- Experimental monitoring of irrigation

Thirty-four individual irrigations were monitored from March to October 2014 over a set of seventeen plots accounting for a large variability of agricultural practices in the area.

The monitoring was carried out using a system composed of three capacitive probes CS616 (Campbell Scientific), each probe, 30 cm long, set in a vertical position with 10 cm within the soil, the remaining 20 cm being above the soil surface. The probes were installed upstream in the field, at few meters of the side where water is supplied. The three probes were set in order to cover the full width of the stream over the field. The output signals of the probes were recorded on a data logger with a time step of 10 seconds from the beginning to the end of the irrigation events. They were used to determine water arrival, recession times and irrigation duration (Ti^*). The discharge rate of the flow injected in the field (Qi^*) was obtained by measurement of the cross-section of the water supply canal and the measurement of the water velocity using a flow meter (micro-moulinet OTT) installed during the irrigation monitoring. The dose applied to the border was compute as

$$Di^* = Ti^* \times Qi^* \quad \dots (1b)$$

Geometrical characteristics of the borders (length, width) were obtained from the field limit GIS layer and the slope was measured using a theodolite.

2.6- Data analysis : calibration and evaluation of models for irrigation dose and duration

Regression models were established for the calculation of irrigation duration and dose from farm and field characteristics recorded during the surveys.

- In a first step, the accuracy of surveys data was evaluated using the field monitoring data. Comparisons were performed for the duration of irrigation (Ti vs. Ti^*) and the applied dose (Di vs. Di^*).
- In a second step, we investigated systematically the correlation between these two variables and possible explicative variables related to irrigation and border structure over

the 69 border in the survey such as length L , width W , surface S , discharge Q_i , discharge/surface, discharge/width, discharge \times surface, soil depth Z and slope I .

- In a third step, empirical relations explaining the irrigation duration T_i and the injected dose D_i were established with the most influential factors (over the 52 survey borders where there was no experimental monitoring of irrigation)
- In a fourth step, the duration and the dose obtained from the regression equations were evaluated against the measurements T_i^* and D_i^* .

The adequacy of calculated variables from the observed data was quantified using different statistical indexes: the determination coefficient R^2 , which indicates the proportion of the variance in the dose and the duration that is predictable from the influential factors, the root mean square error (RMSE) which quantifies the overall accuracy of the model and the mean bias error (MBE) which quantifies systematic errors that would accumulate when upscaling the model:

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

$$MBE = \frac{\sum O_i - \sum P_i}{n}$$

where O_i and P_i are the observed and simulated values respectively, n the number of the pair values.

Results and discussion

3.1 Evaluation of discharge and duration from surveys data against measurements

Figure 4(a) shows a general good agreement between the discharge measured in the field and the theoretical discharge corresponding to the allocation of water by ASA. The determination coefficient is high ($R^2=0.84$) with $RMSE = 0.034 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and almost no bias ($-0.009 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). However, some measurements were significantly higher than survey values. This was related

to the interruption of irrigation in neighbour farms during the period of hay harvest and the release of unused water that would increase the applied discharge in the other farms. In some other situations (not present in our data), the discharge can be lower than allocated because of a reduction in the allocated water by the ASA (up to 40% at the beginning of irrigation season or in crisis situation of water shortage during very dry summers). A good agreement was also obtained between survey and measured duration T_i (Figure 4(b), $R^2=0.73$, RMSE = $6.2 \cdot 10^3$ s, bias = $-1.58 \cdot 10^3$ s). Some significant deviations were visible caused by mismanagement of irrigation (actually the water discharge was not stopped in due time because of the unavailability of the farmer late at night). When dealing with the dose applied to the fields, the good agreements obtained for the duration and the discharge resulted also in a good agreement between the measured and the theoretical doses (Figure 4(c); $R^2 = 0.89$; RMSE = $1.19 \cdot 10^3$ m³; bias = $-0.29 \cdot 10^3$ m³). A good agreement is also obtained for the dose by surface unit (Figure 4(d); $R^2 = 0.72$; RMSE = 41 mm; bias = -13 mm).

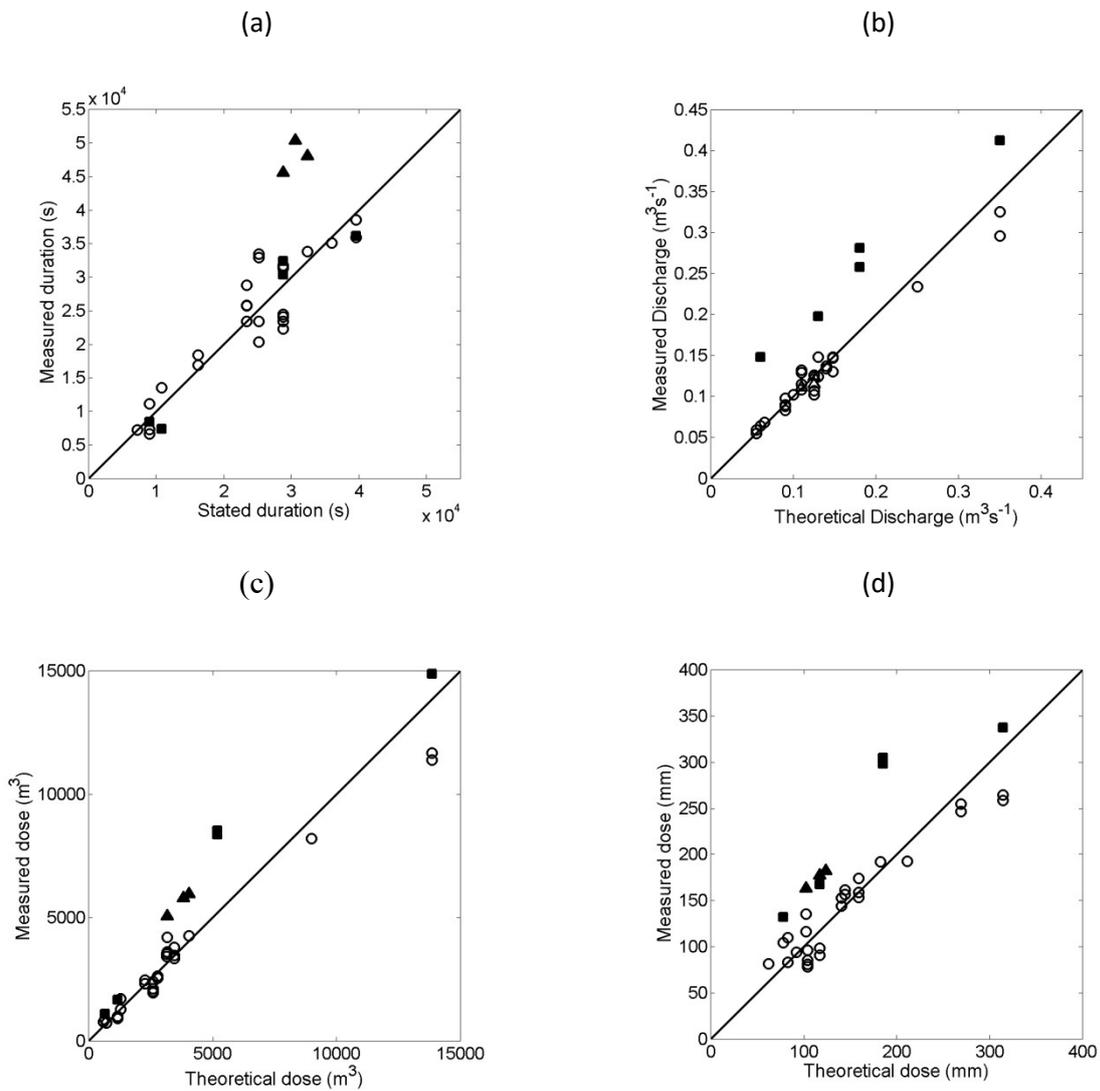


Figure 4 : Comparisons of irrigation duration (a), irrigation discharge (b), irrigation dose (c) and areal dose (d), data obtained from surveys with hay producers and those measured from monitored irrigations. Triangles corresponds to irrigation events for which water was stopped later than “due” time; Squares correspond to larger flow than allocation.

3.2 The injected dose and the irrigation duration models:

3.2.1 Irrigation duration T_i

Correlations between the irrigation duration T_i , as stated by farmers in surveys, and the possible explicative factors are given in Table 2.

Table 2: Determination coefficients R^2 for the duration of irrigation (T_i) and the injected dose (D_i) as a function of border surface (S), border length (L), border width (W), slope (I), soil depth (Z), water flow (Q_i) and combined factors over the 69 border in the survey.

R^2	L	W	S	$L*S$	Z	I	Q_i	Q_i/S	Q_i*S	Q_i/W
T_i	0.73	0.26	0.79	0.72	0.00	0.37	0.07	0.50	0.49	0.05
D_i	0.57	0.35	0.84	0.75	0.13	0.36	0.39	0.23	0.91	0.02

We observed that two main factors explaining the duration of irrigation were the surface ($R^2 = 0.79$, Figure 5(a)) and the length ($R^2 = 0.73$, Figure 5(b)). Actually, in the configuration of the majority of fields in the Crau area, these two factors are well correlated.

Two linear regression models were derived for the irrigation duration T_i (expressed in seconds) as functions of field surface S (expressed in square meters) and field length L (in meters) from the survey data on borders where no irrigation experiment were performed (52 borders):

$$T_i = 0.677 \times S + 2403 \quad (R^2=0.83) \quad (2)$$

$$T_i = 51.6 \times L - 382 \quad (R^2=0.64) \quad (3)$$

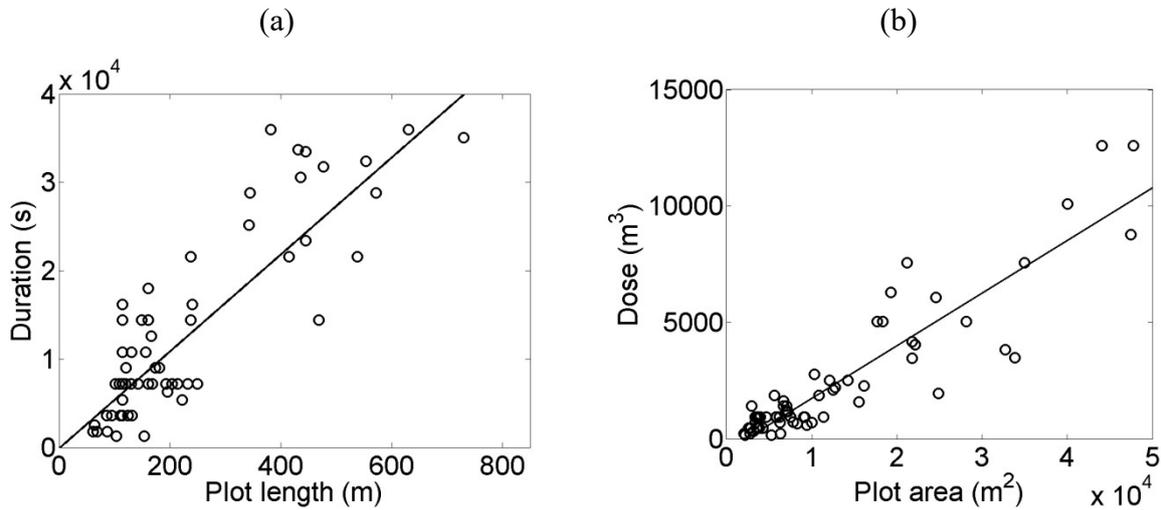


Figure 5: Relations derived from farmer survey data between (a) the irrigation duration T_i and the plot length and (b) the applied dose and the plot surface.

It was possible to improve the determination coefficient up to 0.89 by introducing other factors in multiple linear regressions. This led to the following models as functions of field surface S (m) and water discharge Q_i ($m^3 s^{-1}$), field length L (m) and field width W (m), and L , W and Q_i .

$$T_i = 41.8 \times L + 143.4 \times W - 5527 \quad (R^2=0.79) \quad (4)$$

$$T_i = 49.1 \times L + 202.9 \times W - 30071 \times Q_i - 4244 \quad (R^2=0.85) \quad (5)$$

$$T_i = 0.804 \times S - 23862 \times Q_i + 5609 \quad (R^2=0.89) \quad (6)$$

No further significant improvement was obtained when adding other explanatory factors.

The two best models (Eq. 5 and Eq. 6) were evaluated in the following section. The best model not accounting for discharge was also evaluated (Eq.4).

3.2.2 . The irrigation dose D_i

The correlations between the dose D_i (theoretically applied to the plot and computed from farmer statements) and the possible explicative factors are given in Table 2. As previously for T_i , the irrigation dose D_i expressed in cubic meters, was well correlated to the field surface:

$R^2 = 0.84$ (Table 2, Figure 7). The correlation with the field length was significantly lower: $R^2 = 0.57$ (table 2, Figure 7). The correlation obtained for the dose by surface unit was significantly lower.

The following regression equation with the field surface was found over the 52 borders:

$$Di = 0.2344 \times S - 362.0 \quad (R^2 = 0.88) \quad (7)$$

A slight improvement in R^2 was obtained when using the discharge Qi ($m^3 s^{-1}$) as a second factor ($R^2=0.90$) with the following relation:

$$Di = 0.2106 \times S + 4467 \times Qi - 962 \quad (R^2 = 0.90) \quad (8)$$

Stronger improvement was obtained when considering the surface and the discharge as a product ($R^2=0.93$):

$$Di = 0.6893 \times S \times Qi + 295 \quad (R^2 = 0.93) \quad (9)$$

Adding other factors was not significantly improving R^2 .

The two best models (Eq. 8 and Eq. 9) were evaluated against experimental data in the following section. Eq. 7 which is not accounting for discharge was also evaluated. As it was also possible to compute the applied dose from the irrigation duration and the discharge using Equation 1, two other models combining Eq. 5 or Eq. 6 to discharge data were also considered in the evaluation phase:

$$Di = Qi \times (49.1 \times L + 202.9 \times W - 30071 \times Qi - 4244) \quad (10)$$

$$Di = Qi \times (0.804 \times S - 23862 \times Qi + 5609) \quad (11)$$

3.3 Evaluation of the regression models over individual plots

We used the data acquired during the field experiment (Ti^* and Di^*) to evaluate models derived in the previous section: Eq. 5 (Ti as a function of L , W and Qi) and Eq. 6 (Ti as a function of S and Qi) for the irrigation duration; Eq. 8 and 9 (Di as a function of S and Qi) for the irrigation dose. We also tested the calculation of Di from Eq. 1 by using the duration computed by means of Eq. 5 and 6 combined to the discharge (Di as a function of Ti and Qi): Eq. 10 and 11. In these cases, the water flow appeared as a quadratic term in the equation. Eq. 4 and Eq. 7 which were not accounting for water discharge were also evaluated with the aim of facilitating the possibility of spatial extrapolation of the results when water discharge is unknown.

In general, model performances were good with determination coefficients over 0.7 for models of the irrigation duration and 0.8 for the irrigation dose when they were expressed as a function of plot geometric characteristics and water discharge (Table 3 and Figure 6). When water discharge was not accounted (Eq. 4 and 7) performances were lower, in particular for the irrigation dose (Figure 6 (a,b)). Almost all the tested models presented slight underestimations of the duration and the dose, which can be related to the data with an increased duration (mismanagement of irrigation cut-off) and to the data with an increased discharge compared to ASA value.

The best agreement for the duration was obtained with Eq. 5 based on field length, field width and discharge (Figure 6(c)). For this model underestimation was around one hour ($-3.6 \cdot 10^3$ s). A large part of the discrepancy was due to a triplet of data with a duration exceeding the requested time for irrigating the plot because the water delivery was cut off long after the water reached the end of the plot. Without these data, performances were significantly improved and the bias was limited to 30 minutes ($R^2=0.82$; $RMSE = 5.0 \cdot 10^3$ s; $bias = 1.98 \cdot 10^3$ s). Performances were not improved when using the measured discharge in Eq. 5 or Eq. 6 rather than the theoretical discharge.

The best agreement for the dose was obtained with Eq. 10 which combined the duration computed by Eq. 5 and the discharge (Figure 6 (d)). When considering the real discharge instead of the theoretical discharge, performances were significantly improved as RMSE dropped from $1.5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ to $1.1 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Figure 6 and 7). Again, not considering the triplet of data with large irrigation over-dose and using the real discharge value, Eq. 10 presented a very good agreement with measured data ($R^2=0.97$; $\text{RMSE} = 0.9 \cdot 10^3 \text{ m}^3$; $\text{bias} = -0.41 \cdot 10^3 \text{ m}^3$).

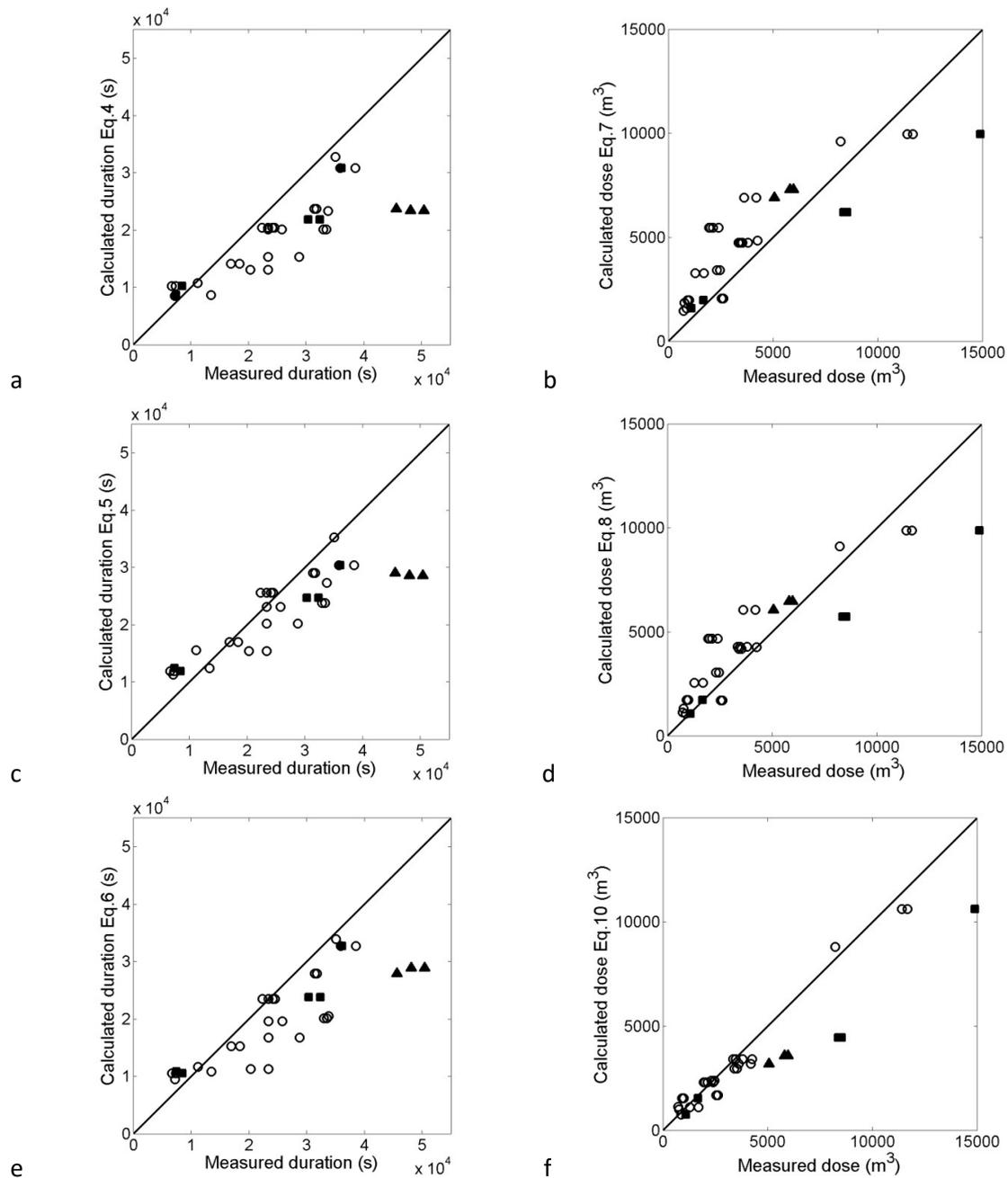


Figure 6: Comparisons of irrigation durations and irrigation doses computed by different models from stated information against field measurements from monitored irrigation. Triangles corresponds to irrigation events for which water was stopped later than “due” time; Squares correspond to larger flow than allocation.

Table 3: evaluation of duration and dose models against measurements

Model	Factors	Q_i			Q_i^*		
		R^2	RMSE	Bias	R^2	RMSE	Bias
Ti, eq. 4	L, W	0.69	$9.8 \cdot 10^3$	$-6.86 \cdot 10^3$			
Ti eq. 5	L, W, Q_i	0.75	$7.5 \cdot 10^3$	$-3.50 \cdot 10^3$	0.75	$7.5 \cdot 10^3$	$-3.76 \cdot 10^3$
Ti eq. 6	S, Q_i	0.71	$8.5 \cdot 10^3$	$-5.36 \cdot 10^3$	0.72	$8.5 \cdot 10^3$	$-5.57 \cdot 10^3$
Di eq. 7	S	0.74	$2.0 \cdot 10^3$	$0.87 \cdot 10^3$			
Di eq. 8	S, Q_i	0.80	$1.7 \cdot 10^3$	$0.35 \cdot 10^3$	0.82	$1.6 \cdot 10^3$	$+0.39 \cdot 10^3$
Di eq. 9	$S \times Q_i$	0.88	$1.7 \cdot 10^3$	$-1.19 \cdot 10^3$	0.94	$1.5 \cdot 10^3$	$-1.09 \cdot 10^3$
Di eq. 10	(Ti eq. 5) $\times Q_i$	0.89	$1.5 \cdot 10^3$	$-0.71 \cdot 10^3$	0.95	$1.1 \cdot 10^3$	$-0.74 \cdot 10^3$
Di eq. 11	(Ti eq. 6) $\times Q_i$	0.89	$1.5 \cdot 10^3$	$-0.87 \cdot 10^3$	0.95	$1.1 \cdot 10^3$	$-0.87 \cdot 10^3$

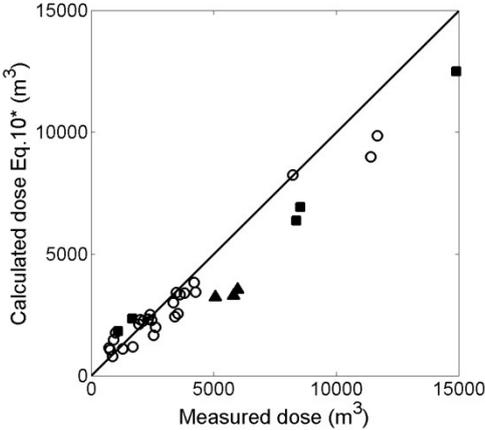


Figure 7: Comparisons of irrigation doses computed by model 10 using measured discharge Q_i^* against field measurements from monitored irrigation. Triangles corresponds to irrigation events for which water was stopped later than “due” time; Squares correspond to larger flow than allocation.

3.4 Evaluation of the models over irrigation block data and time evolution

The irrigation doses computed by the different models were compared to the estimates from the information delivered by farmers in the block survey (Figure 8 and Table 4). Overall performances were better or in the same range as for the calibration of the models and their evaluation against measurements. However, model ranking was quite different as Eq. 10 which was evaluated as the best model in the previous section was here the model presenting

the lowest performances. Eq. 9 presented the best performances. It also appeared that the structure of some models (Eqs. 7, 10 and 11) led to calculated doses lower than zero when the area S of the border or its dimensions L and W were small or/and when the discharge Q_i was high. This generated unrealistic values for the first irrigation block at its first period as it was composed by a hundred of very small borders with area between one quarter and one half of a hectare. Not considering this case, estimation by the different models were more homogeneous (RMSE between $1.2 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ and $1.5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, the best results being obtained by Eq. 9 and Eq.11).

Estimation of the overall dose for each irrigation block at each period is presented in Table 4. A large majority of the estimations were in a +/- 10% range of the 'measured' data and almost all of them in a +/- 15 % range which was a satisfactory results. No estimation for the first period of block 1 was falling in this range. For this case the best agreement between calculated doses and doses estimated from farmer information was given by Eq.9 with an overestimation by 25 %. However, it must be noticed that farmer information for that period was not as accurate as for the other periods.

When considering the possibility to analyse evolution of applied doses in time, the results were not satisfactory since the different models provided contradictory evolutions pointing either an increase or a decrease of the applied dose over each block

Table 4: evaluation of dose models against dose derived from farmer information in the block survey. Grey cells indicate unrealistic values.

Model	Model evaluation			Calculated dose over the irrigation block				
	R ²	RMSE	Bias	B1		B2		
				1997	2006	2012	2003	2014
Di eq. 7	0.94	0.8 10 ³	-0.45 10 ³	3.6 10 ⁴	6.5 10 ⁴	6.7 10 ⁴	3.3 10 ⁴	3.5 10 ⁴
Di eq. 8	0.94	0.9 10 ³	0.29 10 ³	11.9 10 ⁴	7.4 10 ⁴	7.0 10 ⁴	3.7 10 ⁴	3.5 10 ⁴
Di eq. 9	0.94	0.8 10 ³	0.27 10 ³	9.9 10 ⁴	7.8 10 ⁴	7.6 10 ⁴	3.9 10 ⁴	3.8 10 ⁴
Di eq. 10	0.89	1.5 10 ³	-1.02 10 ³	-5.0 10 ⁴	6.9 10 ⁴	6.9 10 ⁴	3.7 10 ⁴	3.9 10 ⁴
Di eq. 11	0.94	1.0 10 ³	-0.62 10 ³	-0.7 10 ⁴	6.9 10 ⁴	7.6 10 ⁴	3.5 10 ⁴	3.9 10 ⁴
Measured dose :				8.0 10 ⁴	6.9 10 ⁴	7.3 10 ⁴	3.8 10 ⁴	3.5 10 ⁴

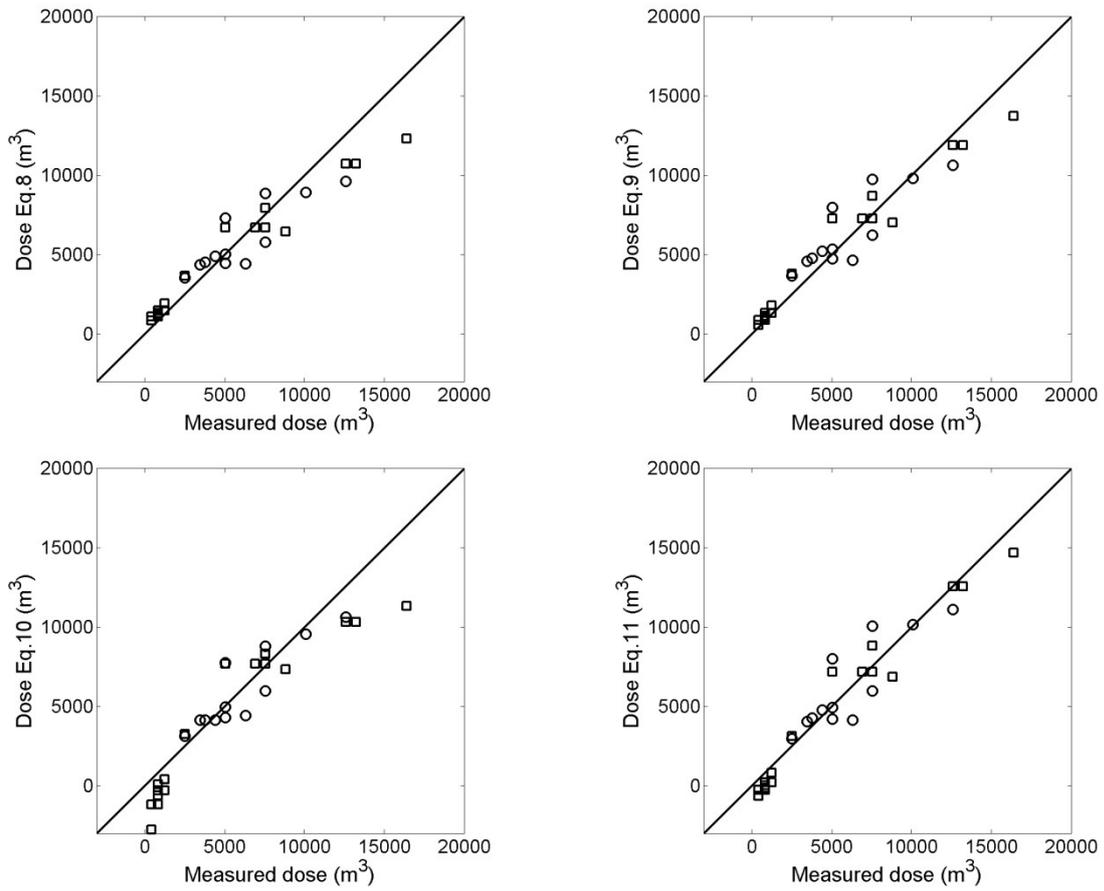


Figure 8: Comparisons of irrigation doses computed by different models from stated information against dose estimations from farmer statements over the block data. Squares correspond to Block 1 and circle to Block 2.

4 Discussion - conclusion

We described regression models for estimating two important characteristics of border irrigation over grasslands in the Crau area: irrigation duration and applied dose. They were developed at the border level from border dimensions (length, width, surface) and water discharge which were found as the most influential parameters affecting duration and dose. Irrigation duration is a central parameter for irrigation scheduling at the farm level and then for manpower management and cost. Most of the operations, several hundred for one farm, are realized manually and labor related to irrigation is one of the most important costs of hay production (more than 20% of the total cost, Martin 2008). On its side, the cost of irrigation water represents less than 10% of the total cost and is not directly related to the quantity of water really used but to water rights. As a consequence, there is no precise monitoring of irrigation water use on irrigated grasslands and the quantity of irrigation water used in the Crau area is poorly known. It is then difficult to establish an accurate water balance over the area (Guérin et al. 2009, Oliso et al. 2013b). This is more and more problematic as border irrigation is using a very high amount of water compared to plant needs, while the pressure on water resources is increasing in the area and a more efficient management of water use and water allocation between the different uses is requested by governmental agencies (Baillieux et al. 2015).

It is important to note that the training dataset that we used for deriving our models was composed of information obtained from the farmers, the irrigation duration and the “theoretical” discharge, and not from direct measurements. Actually, irrigation duration is well known by farmers for each border since the irrigation schedule was in general established a long time ago in agreement with the farm structure (disposition of the field one to another and its position along the different channels) and is repeated for each water turn with only few deviations. The theoretical discharge corresponds to the water flow delivered from the main channel in accordance with water right for each particular farm and ASA. The

measurements performed over some of the fields were globally confirming farmer information. Few measurements indicated higher discharges, in relation to an increase of available water thanks to lower irrigation in neighbor farms, and higher durations due to late stopping of irrigation at night. For each border, variations in duration and dose also occurred from one irrigation event to another because the water flow over the border was influenced by the amount of vegetation and the level of soil moisture when the irrigation started. Thus the duration values stated by farmers represented a typical duration for each border (the oldest data obtained during the irrigation block survey may be less “accurate”). Most of the calibrated models presented a good fit with the training dataset showing a good coherence of the information stated by farmers. This was confirmed when evaluating the models against experimental determination of duration and applied dose and against irrigation block data. This opens the possibility to use the models for estimating the dose applied over the different fields in the Crau area and for providing a distributed estimate of the quantity of water brings by irrigation in the Crau hydrosystem. However, the analysis of the evolution of the amount of water given to irrigation blocks was showing that the different models were providing contradictory information on the evolution of the applied dose. This indicates that the models were not accurate enough to catch the slight evolution of water amount from one period to another.

From our analysis it may be difficult to state which model was performing the best over our datasets. In numerical evaluation over measured data, Eq. 5 and 6 were providing the best estimates of irrigation duration and Eq. 9, Eq. 10 and Eq. 11 were providing the best estimates of the applied dose. All these models included the water discharge Q_i as input and they presented performances clearly higher than models not accounting for discharge. For the dose, the models built by considering the irrigation duration performed well. However, all the models except Eq.9 were giving unrealistic values for small borders (< 0.3 ha) particularly for high discharge, so that they were not suitable for calculating duration and dose in many

situations, in particular in the past (as shown by block 1). When considering the possible applications of the models it may be also stated that models including the border area would be more robust than models including the field dimensions. Indeed many fields have not a quadrangle shape. From these considerations both Eq.9 and Eq.11 may be considered, paying attention that Eq.11 is only valid for border with area larger than at least 0.5 hectare (depending on discharge level).

We wanted to test hypothesis on the evolution of applied dose as a function of the size of the border. First, the increase of the applied dose with the field length was clearly visible in all situations (Table 2, $R^2 = 0.57$). A stronger link was obtained with the border surface (Table 2, $R^2 = 0.84$). Concerning the dose by unit of surface, correlations with length and surface were clearly lower. We found positive correlations with the length of the borders ($R=0.20$) and the surface ($R=0.34$). When considering data for the highest discharges ($Qi > 0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) correlation coefficients increased up to 0.23 and 0.46 respectively. This was in agreement with the common thinking of the farmers and with the results of numerical studies (Mailhol and Mérot, 2008, Bader et al., 2010, Alkassem Alosman et al., 2015). However, these numerical studies were performed considering a constant water discharge, while in our experimental results the water discharge globally increased with plot length and plot area ($R = 0.54$ and $R = 0.63$, respectively): a higher discharge is requested for irrigating longer plots. Concerning our models, all the irrigation dose models were catching this behavior (with correlation coefficients ranging between 0.52 and 0.88). When considering constant discharge, as in border restructuration event, only models 7, 8 and 11 were presenting an increasing areal dose when the border length or the border area was increasing.

The evolution of the dose by surface unit and the size of the border suggest that the restructuration of irrigation blocks may affect the quantity of water used for irrigation. As restructuration is usually designed for reducing the number of borders it is anticipated that the quantity of water used would increase. However, restructuration is not only concerning the

number and the size of the borders. At the same time, grassland area may increase since some tree hedges and small channels may be removed. A new levelling of the soil surface can be done for optimizing water flow and the distribution of vegetation changes also affecting the water flow. In fine, the evolution of the irrigation dose applied to one block may be quite different than the anticipated evolution and a decrease of the irrigation dose is possible.

As a summary, we can conclude that if it may be possible to derive regression models for calculating irrigation duration and irrigation dose, their accuracy may be not high enough for monitoring changes in water use related to changes in irrigation block structure. Further work is now required for providing a fully independent assessment of the different models over a larger set of field measurements and in a second time for the implementation of the models over the whole Crau area. The possible use of the different models will depend on the possibility to inform border dimensions and water discharge over the area.

References

- Alkassem Alosman, M., Ruy, S., Oliosio, A., Flamain, F., Lecharpentier, P., Buis, S., Bader, J.C.,
Charron, F., Belaud, G., Baillieux, A., (2015). Utilisation d'un modèle à base physique pour l'optimisation multicritères de l'irrigation des prairies par submersion. Colloque GFHN, 23/11/2015 à Marne-La-Vallée. 6 pages.
- Bader, J.C., Saos, J.L., Charron, F., (2010). Model of border irrigation runoff, advance and infiltration on a soil covering a very permeable subsoil. *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.* 55, 177–191. doi:10.1080/02626660903546050
- Baillieux, A., Oliosio, A., Trolard, F., Chanzy, A., Lecerf, R., Lecharpentier, P., Banton, O., Ruget, F., Ruy, S., (2015). Changements globaux: quels impacts sur l'aquifère de la Crau ? *Géologues* 85–92.
- Balland, P., Huet, P., Lafont, E., Leteurtois, J.P. & Pierron, P., (2002). Rapport sur la Durance:
Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance – Contribution à un Plan Durance. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère délégué à l'Industrie, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires Rurales, Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, Paris, 98 pp.
- Beltrando, G., (2015). La plaine de la Crau (ouest de la Provence), un territoire aux enjeux socioéconomiques et écologiques en mutation », *Cybergeo : European Journal of Geography, Espace, Société, Territoire*, document 755, URL : <http://cybergeo.revues.org/27356> ; DOI : 10.4000/cybergeo.27356.
- Clémentz M.L. (1999) – Les effets induits de l'irrigation gravitaire sur la nappe alluviale et le système hydrographique naturel. Etude dans le périmètre irrigué du canal Saint-Julien, DESS Hydrogéologie et Environnement-Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 1999, 111 p.
- FAO-UNESCO, (1981). Soil map of the world – 1/5.000.000. Food and Agricultural Organisation, Rome.
- Gillon, M., Cognard-plancq, A., Marc, V., Nofal, S., Travi, Y., Babic, M., Daniel, M., Simler, R., Tison, F., (2015). How much do human activities influence shallow groundwater recharge? An example of using isotope lumped parameters models to investigate the impact of irrigation practices in two Mediterranean alluvial aquifers (IAEA-CN-225/126p). Presented at the International symposium on Isotope Hydrology, revisiting foundations and exploring frontiers, Vienna, Austria 11-15 may 2015. *poster*.
- Guérin, C., Sonnet, O., Scholl, P., Léonhard, S., (2009). Diagnostic qualitatif /quantitatif et analyse de l'évolution des risques sur la nappe de la Crau. Rapport GINGER ENVIRONNEMENT.
- Khanna, M., Malano, H.M., (2006). Modelling of basin irrigation systems: A review. *Agric. Water Manag.* 83, 87–99. doi:10.1016/j.agwat.2005.10.003
- Lacroix M. (1991) – Impact de l'irrigation sur un aquifère alluvial. Dynamique du système Basse Durance, Thèse de l'Université de Besançon, 161 p.

- Mailhol, J.C., Merot, A., (2008). SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region. *Irrig. Sci.* 26, 289–302.
- Martin, E., (2008). Aspects économiques de gestion de l'eau souterraine. Doctorat ès Sciences Economiques, Aix Marseille 2.
- Merot, A., Bergez, J.-E., Capillon, A., Wery, J., (2008a). Analysing farming practices to develop a numerical, operational model of farmers' decision-making processes: An irrigated hay cropping system in France. *Agric. Syst.* 98, 108–118.
- Merot, A., Bergez, J.-E., Wallach, D., Duru, M., Charron, F., Capillon, A., Wery, J., Isbérie, C., Mailhol, J.-C., (2011). Gestion de l'eau en Crau : comment s'adapter aux tensions sur la ressource en eau à l'échelle des exploitations agricoles. *Sci. Eaux Territ.* 1–8.
- Merot, A., Wery, J., Isberie, C., Charron, F., (2008). Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *Eur. J. Agron.* 28, 8–18.
- Nofal, S., Blavoux, B., Cognard-Plancq, A., Marc, V., Travi, Y., (2015). L'approvisionnement en eau potable de la ville d'Avignon Impact de l'urbanisation sur la nappe alluviale au confluent Rhône - Durance. *Géologies* 167 : 61-64.
- Olioso, A., Lecerf, R., Baillieux, A., Chanzy, A., Ruget, F., Banton, O., Lecharpentier, P., Trolard, F., Cognard-Plancq, A.-L., (2013a). Modelling of Drainage and Hay Production over the Crau Aquifer for Analysing Impact of Global Change on Aquifer Recharge. *Procedia Environ. Sci.* 19, 691–700. doi:10.1016/j.proenv.2013.06.078
- Olioso, A., Lecerf, R., Chanzy, A., Ruget, F., Huard, F., Baillieux, A., Rossello, P., Lecharpentier, P., Trolard, F., Charron, F., Ruy, S., Alkassam Alosman, M., Cognard-Plancq, A.-L., Seguin, B., Courault, D., Gallego-Elvira, B., Garrigues, S. (2013b). Bilan hydrique des agrosystèmes de Crau face aux changements globaux. In *écologie et conservation d'une steppe méditerranéenne. La plaine de Crau. Coordination Tatin, L., Wolff, A., Boutin, J., Dutoit, T.* Edition Quae, Paris, France. ISBN-13 9782759220823. Pages 266-288.
- Peyre M. (1927). Les irrigations de la basse Durance. In: *Annales de Géographie*, t. 36, n°199, 1927. pp. 40-57. doi : 10.3406/geo.1927.8588. http://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1927_num_36_199_8588
- Qin, D., Qian, Y., Han, L., Wang, Z., Li, C., Zhao, Z., (2011). Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. *J. Hydrol.* 405, 194–208.
- Saos, J.-L., Belaud, G., Charron, F., Le Goulven, P., 2006. Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en Crau (Rapport finale). UMR G-Eau—Supagro, Montpellier.
- Seraphin, P., Vallet-Coulomb, C., Gonçalves, J., (2015). Groundwater mass balance of the Crau aquifer estimated through a stable isotope-mixing model ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$). Presented at the Conf Sicmed, Marseille.
- SOGREAH, 2010. Schéma d'orientations pour une utilisation raisonnée et solidaire de la ressource en eau (Rapport de diagnostic).

4 Partie 4 : Discussion générale et conclusion

4.1 Discussion générale

La forte consommation d'eau par le système d'irrigation gravitaire amplifie la pression sur l'usage de l'eau par l'agriculture. En s'ajoutant aux pressions sur les ressources en eau causées par les changements globaux (climatiques et anthropiques), cela pourrait conduire à une augmentation des déficits hydriques à l'échelle de bassins versants comme celui de la Durance. L'optimisation de la performance de ce système d'irrigation en améliorant son efficacité est nécessaire afin d'adapter les systèmes de cultures aux disponibilités en eau aujourd'hui et dans le futur et pour ne pas pénaliser les autres usages de l'eau, agricoles ou non-agricoles. Cette optimisation nécessite la détermination des doses d'eau apportées dans ce système d'irrigation, des quantités d'eau infiltrées et drainées aux niveaux parcellaire et régional.

Afin de satisfaire ces objectifs, notre travail vise à apporter des connaissances concernant les aspects hydriques de l'irrigation gravitaire en Crau incluant :

- (i) caractériser les dynamiques des principaux processus dans un modèle numérique (Calhy), qui décrit ce système d'irrigation, en particulier à l'aide d'un système d'analyse de sensibilité permettant de déterminer les paramètres ayant le plus d'influence sur ces processus et de proposer une méthode pour les estimer ;
- (ii) valider la méthode proposée en l'appliquant sur des données réelles (expérimentales) ;
- (iii) étudier par simulation des scénarios d'optimisation de l'irrigation à l'échelle de la parcelle faciles à mettre en œuvre sur le terrain,

(iv) proposer une méthode alternative pour calculer la dose d'irrigation à l'échelle de la parcelle en établissant un modèle de dose empirique qui pourrait être appliqué à l'ensemble de la Crau.

Les résultats obtenus dans ce travail pour atteindre chacun de ces objectifs sont discutés et des perspectives à court et moyen termes sont proposées dans ce qui suit.

1- Caractérisation numérique de la capacité du modèle d'infiltration-ruissellement CALHY à rendre compte des différents processus impliqués et à identifier les paramètres principaux : analyse de sensibilité globale.

Certains paramètres des modèles d'irrigation par submersion tel que celui utilisé dans cette étude (le modèle « Calhy ») sont difficiles à déterminer ou à mesurer de telle sorte qu'ils soient représentatifs spatialement à l'échelle parcellaire. Une méthode classique est de les estimer en recalant le modèle par rapport à certaines de ses variables de sortie mesurables (Bader et al., 2010; Clemmens, 2009; Ebrahimian et al., 2010; Mailapalli et al., 2008; Sedaghatdoost and Ebrahimian, 2015; Weibo et al., 2012).

Jusqu'à présent, aucune étude concernant l'estimation de ces paramètres, tel que k et K_s , ne s'était basée sur une analyse de sensibilité rigoureuse permettant d'identifier d'une part les processus les plus influencés par ces paramètres et, d'autre part, les variables mesurables les plus à même à être utilisées. Ebrahimian et al. (2010), Elliott et al. (1983), Mailapalli et al. (2008) et Shepard et al. (1993) ont utilisé des données peu nombreuses telles que la courbe d'avancement de la lame d'eau à la surface du sol pour estimer les paramètres d'infiltration et valider les résultats obtenus. Cependant, on ne connaît pas la sensibilité des variables utilisées aux paramètres à estimer. Walker (2005) et Wang et al. (2007) ont proposé des méthodes d'estimation plus complexes utilisant des données expérimentales plus nombreuses et de natures différentes à la fois en phase d'estimation des paramètres et en phase de validation.

Ces données sont coûteuses à acquérir (en temps et en argent). De plus, en l'absence d'analyse de sensibilité, on ne peut savoir si le dispositif expérimental est optimal vis-à-vis de la problématique de l'estimation des paramètres. Il s'agit d'utiliser un nombre minimal de données pour la calibration du modèle et de conserver suffisamment de données indépendantes pour l'évaluation des sorties du modèle.

Nous avons réalisé une analyse de sensibilité globale (en appliquant de la méthode E-FAST) entre les paramètres physiques à estimer et les différents types de variables mesurables afin d'identifier un dispositif expérimental optimal (du point de vue du temps d'acquisition des données sur le terrain) et efficient (qui permet d'estimer les paramètres de façon univoque). Cette analyse a été réalisée en utilisant des variables synthétiques liées au bilan hydrique (Variables d'intérêt), générées par le modèle telles que l'infiltration cumulée sur toute la parcelle $F_{infiltr}$ et la hauteur d'eau moyenne au-dessus de la surface du sol H_{mean} : on se trouve donc dans un cas idéal où le modèle utilisé décrit parfaitement la réalité supposée du processus d'infiltration/ruissellement.

Ce travail permet de mieux connaître le fonctionnement du système d'irrigation, dans un premier temps en déterminant les paramètres qui ont des effets significatifs sur les variances des variables d'intérêt et, dans un second temps, en permettant de classer les principaux paramètres non mesurables selon leur importance et leur contribution aux variances des variables du bilan hydrique. L'analyse de sensibilité montre que le flux d'infiltration est d'abord sensible au paramètre K_s (conductivité hydraulique à saturation) et, dans une moindre mesure, à $\Delta\theta$ (déficit initial de teneur en eau du sol). La hauteur de la lame d'eau, une variable facilement mesurable, est sensible aux paramètres k (coefficient de friction hydraulique de Manning-Strickler) et H_0 (détention superficielle à la surface du sol) dans la partie amont et K_s et $\Delta\theta$ dans la partie aval de la parcelle.

Étant difficiles à mesurer avec une bonne précision, les variables d'intérêt ne peuvent pas être utilisées pour ajuster les paramètres auxquels elles sont sensibles. Pour l'estimation de ces

paramètres, on a identifié des variables alternatives accessibles (mesurables et sensibles à ces paramètres). Ces variables sont déterminées sur deux sections de la parcelle, en amont et en aval, à partir de l'évolution temporelle de la lame d'eau. Il s'agit de la hauteur maximale de la lame d'eau H_{max} , du temps d'arrivée de la lame d'eau T_{arrive} , du temps de submersion $T_{submersion}$ et de l'intégrale de la hauteur de la lame d'eau durant le temps de submersion H_{integ} . Elles sont ensuite utilisées dans un processus d'ajustement des paramètres par la méthode inverse du SIMPLEX. On a trouvé que

- i) les données observées de H_{max} et H_{integ} en amont et T_{arrive} en aval de la parcelle sont suffisantes pour estimer k et H_0
- ii) les données observées de H_{max} , T_{arrive} , $T_{submersion}$ et H_{integ} en aval permettent d'estimer K_s , k , H_0 et $\Delta\theta$ précisément.

Limites et perspectives

L'analyse de sensibilité a été conduite sur une parcelle virtuelle dont les caractéristiques correspondent à celles d'une parcelle qui se situe au Domaine de Merle. Elle est le reflet de parcelles typique et nivelées que l'on trouve en Crau en termes de longueur, largeur, débit d'injection et durée de l'irrigation. Cependant, au travers de nos enquêtes nous avons pu observer une grande diversité dans la géométrie des parcelles et dans les débits d'irrigation : cette diversité n'a pas été étudiée et il est possible que les caractéristiques de certaines parcelles ne permettent pas une aussi bonne estimation des paramètres.

- a) Malgré le peu d'influence du paramètre P_{ini} aux variables d'intérêt étudiées, il faut le déterminer quand même. Nous l'avons estimé en établissant une relation avec le paramètre $\Delta\theta$ à partir des valeurs fournies par Bader et al. (2010). Ces auteurs ont indiqué que l'évolution de P_{ini} était proportionnelle à $\Delta\theta$.

Il serait également possible d'estimer P_{ini} en définissant une nouvelle proxy variable ayant une forte sensibilité à P_{ini} pour l'estimer par inversion avec les autres paramètres comme le temps de mise en place de la lame d'eau de la surface de la parcelle (temps entre le démarrage de l'irrigation et le régime permanent).

- b) Dans notre démarche, nous n'avons pas mis en œuvre une démarche systématique visant à diminuer le nombre de données expérimentales à utiliser. Il est possible que d'autres configurations expérimentales conduisent à de bonnes qualités d'ajustement.

2- Application de la méthode proposée pour définir les paramètres du modèle CALHY à partir des données expérimentales : estimation des paramètres par inversion.

La méthode proposée précédemment pour estimer les paramètres du modèle d'irrigation non mesurables et ayant une influence importante sur le bilan hydrique a été mise en place en utilisant des « proxys variables » extraites à partir de l'évolution temporelle de la hauteur de la lame d'eau mesurée sur le terrain. Les résultats d'estimation par inversion en utilisant l'algorithme SIMPLEX montrent que :

- les paramètres k et Ks ont été estimés avec de bonnes précisions. En particulier le sens physique des paramètres estimés est conservé : pour une parcelle donnée, nous avons observé que le paramètre Ks est très stable d'une inversion à l'autre, alors que le paramètre k suit une évolution en accord avec le développement de la couverture végétale. Il est observé que le paramètre k arrive à une valeur seuil constante dès que la couverture végétale arrive à un certain développement, ce qui est conforme aux observations et au modèle reliant k et le LAI développé par Mailhol et Merot (2008) ;
- les estimations des paramètres $\Delta\theta$ et H_0 ont été réalisées avec des précisions moins bonnes : ces paramètres n'ont cependant pas une grande influence sur le bilan hydrique et une estimation « imprécise » est suffisante au premier ordre ;
- P_{ini} a également une faible influence et peut être estimé à partir de $\Delta\theta$.

Limites et perspectives

a) Dans la procédure d'estimation des paramètres, nous avons défini des bornes limites entre lesquelles la valeur cible à estimer du paramètre doit se trouver. Dans certains cas, des bornes trop éloignées ont pu conduire à un échec de la procédure d'ajustement, en particulier pour les fortes valeurs de K_s qui s'accompagnent d'une infiltration totale de la lame d'eau sur la parcelle, la lame d'eau ne pouvant se propager en aval.

Pour définir ces bornes, nous nous sommes basés sur les travaux de Bader et al. (2010) qui ont mené leur travail sur la même parcelle où on a mené notre travail. Pour appliquer cette méthode ailleurs il faut déterminer ces limites soit depuis la littérature, soit par apport aux mesures effectuées sur le terrain.

b) Inversement, une meilleure estimation a priori des valeurs cibles de K_s ou $\Delta\theta$ pourrait réduire les limites des valeurs de ces paramètres et par conséquent améliorer leurs qualités d'estimation et celles des paramètres restants. Ainsi estimer à l'échelle de la parcelle le déficit de teneur en eau soit à partir de techniques expérimentales (géophysique, radar, ...) soit à partir de modèles (exemple : utilisation du modèle STICS pour estimer le déficit de teneur en eau du sol avant l'irrigation), soit à partir d'une combinaison de ces deux méthodes, pourrait permettre de fournir une première estimation plus précise pour les paramètres inconnus restant.

c) L'hétérogénéité spatiale de la couverture végétale et de la pente au sein des parcelles dans certaines exploitations de Crau peut apporter des difficultés d'estimation du comportement de l'irrigation prédit par le modèle Calhy (paramètres en inversion et variable des sorties en mode direct). Le modèle CALHY est écrit sous une forme 1D : il ne peut pas décrire facilement des irrigations dans des parcelles ayant la forme de triangle, des apports d'eau « parasites » venant d'une parcelle annexe ou un mauvais nivellement. Ces situations se rencontrent fréquemment en Crau. Une version 2D d'un modèle de ruissellement permettrait de prendre en compte plus de diversité dans les situations des

parcelles et des irrigations. Lorsque les parcelles sont conformes aux hypothèses du modèle CALHY, celui-ci permet cependant une bonne estimation des paramètres et du bilan hydrique de l'irrigation.

- d) Il est supposé que le débit utilisé en entrée du modèle Calhy, que ce soit en mode direct ou inverse, est une fonction logarithmique de la valeur mesurée sur le terrain pour les premiers 1.5-2 heures de l'irrigation puis reste stable jusqu'à la fin de l'irrigation (En fait, le débit est mesuré dans la filiole amenant l'eau à la parcelle). Cette hypothèse est observée sur le terrain car l'eau au début de l'irrigation doit remplir le canal d'amené avant de commencer à submerger la parcelle. Il est également observé des fluctuations du débit au cours de l'irrigation qui se répercutent sur l'évolution de la hauteur d'eau suivie. Ces fluctuations sont en général dues aux arrêts et démarrages des irrigations de parcelles voisines et provoquent aussi des variations du débit alloué.

Dans tous les cas, prendre en compte dans le modèle CALHY l'évolution temporelle du débit d'entrée améliore la qualité d'estimation des paramètres. Inversement, en cas de non prise en compte de ces fluctuations, les proxy-variables peuvent être mal reconstituées.

- e) Dans certain cas les mesures de débit d'irrigation ne sont pas disponibles (irrigation pendant la nuit). Il est cependant possible d'inclure le paramètre Q_i dans l'ensemble des paramètres ayant besoin d'être estimé. Quelques tests ont été réalisés qui semblent être positifs. Bien sûr il serait également possible d'utiliser des appareils automatiques de mesures du débit.
- f) L'estimation du coefficient de frottement hydraulique k permet d'établir une relation entre ce paramètre et le nombre de jours après la coupe de foin. Cette relation pourrait être utilisée pour déterminer ce paramètre dans une approche régionale de calcul des doses d'irrigation sur l'ensemble des parcelles agricoles.
- g) Le flux d'infiltration produit par Calhy après l'estimation de ses paramètres pourrait être vérifié en utilisant des méthodes de mesures alternatives comme l'ERT (Tomographie de

résistivité électrique) qui est applicable au niveau parcellaire (voir Ma et al. (2011)). Il serait également possible d'établir cette vérification avec des mesures effectuées en utilisant la méthode isotopique à l'échelle régionale (voir (SERAPHIN et al., 2015)), ou plus localement à partir des variations piézométrique (Vallet-Coulomb et al. 2016).

3- Optimisations multicritères du système d'irrigation gravitaire

Dans cette thèse l'optimisation de système d'irrigation étudié a été réalisée en deux étapes commençant par l'identification d'un critère d'arrêt de l'irrigation en fonction de la longueur de la parcelle et dans une deuxième étape portant sur la modification de la géométrie et la modification du mode de submersion de la parcelle.

L'arrêt automatique doit assurer un remplissage de la réserve utile tout en minimisant la quantité d'eau perdue en aval de la parcelle ; l'injection de l'eau d'irrigation est stoppée lors que l'eau ruisselée à la surface de la parcelle atteint 90% de sa longueur ; la lame d'eau continue à submerger la partie restante sous l'effet de la pente et la force de gravité. Ce critère a été observé au cours des expérimentations menées chez les producteurs de foin de Crau. Il est également cité par (Bader et al., 2010; Merot et al., 2008).

Ce critère a été appliqué sur les six scénarios proposés dans la deuxième étape. Nous nous sommes concentrés sur 3 scénarios proposant des combinaisons de modifications de la longueur de la parcelle avec des modifications du mode de submersion et sur deux scénarios portant sur la modification de la géométrie. Ils sont comparés au scénario classique trouvé en Crau. D'autres types de scénarios avaient déjà été proposés dans la littérature. Bader et al., (2010) ont proposé des scénarios d'optimisation en modifiant les débits injectés et la longueur de la parcelle. Merot et al. (2008) ont optimisé les calendriers d'irrigations appliqués en les pilotant à partir des indications de l'état hydrique des sols par des mesures tensiométriques.

Nous avons montré que l'injection de l'eau dans la parcelle depuis deux points consécutivement en amont et au milieu peut réduire la durée de l'irrigation jusqu'à 50% par rapport au mode de submersion classique (de l'amont jusqu'à l'aval) et par conséquent les quantités d'eau injectées et drainées.

Limites et perspectives

- a) Le critère d'arrêt automatique a été étudié en fonction des valeurs du paramètre K_s et de $\Delta\theta$. Une analyse plus complète en fonction des autres paramètres déterminant la performance du ruissellement et de l'infiltration dans l'irrigation gravitaire n'a pas été encore été effectuée. En particulier le critère d'arrêt est conditionné par la vitesse d'avancement de la lame d'eau qui dépend également du frottement hydraulique k .
- b) Les scénarios ont été étudiés sur une parcelle virtuelle présentant une forte perméabilité ($K_s=2*10^{-6}$). Analyser ces scénarios en tenant en compte la diversité de K_s que l'on trouve en Crau pourra clarifier au mieux leurs effets.
- c) Ces scénarios ont été établis dans un environnement numérique et n'ont pas pris en compte l'hétérogénéité spatiale au sein des parcelles. En fonction de la répartition spatiale des propriétés des sols et de la distribution de la végétation, des modifications des résultats pourraient être obtenues. Cependant nous n'avons pas vraiment à l'heure actuelle d'informations disponibles sur cette variabilité spatiale, en particulier pour K_s . Des informations sur la distribution de la quantité de végétation pourraient être obtenues à partir d'images de télédétection (réflectances multi-spectrales) et être utilisées pour caractériser k . Des informations sur la variabilité spatiale de l'humidité de surface du sol pourraient également être obtenues à partir d'informations de télédétection radar (ElHajj et al. 2016), mais ces informations restent à être reliées aux paramètres de Calhy. Une piste de travail à entreprendre également sera de développer une version du modèle

CALHY permettant de tenir compte de la variabilité des paramètres au sein de la parcelle, du moins au long de l'écoulement longitudinal. Cela ne doit pas à priori poser de problèmes majeurs et doit pouvoir être mis en œuvre informatiquement assez simplement.

- d) Le test des scénarios en conditions réelles, hors de l'environnement numérique, est complexe à mettre en œuvre pour beaucoup d'entre eux. Cela nécessiterait une forte adhésion des agriculteurs concernés, ce d'autant plus que la tendance actuelle des restructurations effectuées en Crau est plutôt à une augmentation de la taille des calans. Ces restructurations visent surtout la réduction du temps de travail et la simplification de la gestion des tâches d'irrigation, l'aspect de réduction possible des quantités d'eau utilisées n'étant pas pour le moment un facteur déterminant. Les scénarios proposés dans mon travail peuvent, pour certains, s'accompagner d'une augmentation des heures du travail ou d'aménagements coûteux.
- e) Due à l'importance de la contribution du système d'irrigation gravitaire avec son drainage à la recharge de la nappe souterraine de la Crau, l'impact des scénarios proposés sur la ressource en eau souterraine à l'échelle régional doit être quantifié.

4- Modèle empirique de dose

Le travail présenté dans cette thèse vise à évaluer les impacts de la gestion des pratiques d'irrigation sur la dose d'eau apportée et sur leurs évolutions. Parallèlement à la mise en place d'un modèle numérique basé sur une représentation physique des processus d'écoulement et d'infiltration, une modélisation empirique des doses apportées en fonction de caractéristiques simples des parcelles et des pratiques a été analysée. Un tel modèle permettrait de spatialiser plus facilement les doses d'irrigation car ne nécessitant pas de renseigner des paramètres difficiles à estimer sur tout un territoire.

Les résultats montrent que :

i) la durée nécessaire pour irriguer une parcelle (T_i) peut être calculée en fonction de ses dimensions (longueur largeur, surface) et du débit théorique (Q_{ASA}) alloué par l'ASA à laquelle la parcelle appartient.

ii) la dose appliquée peut se calculer en fonction de la durée T_i et du débit Q_{ASA} .

Puisque les cotisations pour l'eau d'irrigation en Crau sont déterminées à partir des allocations et sont indépendantes de la quantité d'eau réellement consommée, il n'y a pas à l'heure actuelle de connaissances détaillées des consommations réelles. Les modèles empiriques déterminés par ce travail apportent des connaissances sur la dose d'irrigation et peuvent être utilisés pour obtenir des informations à des échelles plus larges qui seront utiles pour déterminer le bilan hydrique à différentes échelles. Il a été montré cependant que les modèles n'étaient pas assez précis pour évaluer l'impact des évolutions de la structure des parcelles et des pratiques d'irrigation sur les doses globales apportées à l'échelle du bloc d'irrigation.

Limites et perspectives

- a) Il est difficile d'exploiter les limites des calans sur la carte de limitation parcellaire pour la Crau ce qui rend difficile d'appliquer les modèles de la durée et de la dose à l'ensemble de la Crau.
- b) Certains des modèles établis ne marchent pas pour les petites parcelles car ils donnent des valeurs irréalistes trop faibles, voire négatives, en raison de la structure des équations. Dans ce cas il est nécessaire d'utiliser les modèles les plus adaptés aux petites parcelles, mais qui ne sont pas ceux qui fournissent les meilleurs résultats pour l'ensemble des parcelles.
- c) La faible disponibilité des informations sur les débits d'ASA distribués aux exploitations et les partitions de débit alloué observées dans certaines exploitations limitent

l'application des modèles. Les évolutions de structure du parcellaire ne se traduisent pas uniquement par une modification des caractéristiques géométriques des parcelles, mais souvent aussi par des modifications des conditions d'écoulement grâce à un nouveau nivellement des parcelles et une réimplantation de la végétation. Ces facteurs ne sont pas pris en compte dans les modèles empiriques. La mise en place de ces derniers se fait en effet en considérant implicitement que les caractéristiques d'écoulement et d'infiltration des parcelles ont des effets à peu près similaires d'une parcelle à une autre sur l'ensemble du territoire étudié. Une analyse de la forme des modèles empiriques et de leurs incertitudes au moyen du modèle numérique Calhy pourrait être envisagée pour mieux cerner les conditions d'utilisation des modèles empiriques.

4.2 Conclusion

Sur la région de la Crau, les activités agricoles liées à la culture du foin de Crau et à l'irrigation des prairies de foin jouent un rôle important dans le maintien du système écologique en étant le principal contributeur à la recharge de la nappe souterraine de la Crau (70 à 80% de la recharge est due à l'irrigation) et en contribuant directement ou indirectement à l'alimentation de certaines zones humides. Des gros volumes d'eau doivent être apportés sur la parcelle à chaque irrigation du fait du système d'irrigation gravitaire, ce qui génère des pertes d'eaux importantes par drainage profond sous la zone racinaire ou par perte par ruissellement en sortie de parcelle. Ces volumes d'eau sont prélevés dans la réserve de Serre-Ponçon. Dans le futur, des pressions sur la ressource en eau utilisée pour l'irrigation des prairies en Crau risquent de s'accroître du fait des changements climatiques, de l'augmentation des autres usages de l'eau (besoins domestiques, industriels, récréatifs) et de l'augmentation des débits alloués au soutien d'étiage de la Durance. Optimiser l'irrigation tout en maintenant l'état des ressources en eau souterraines en Crau est donc un enjeu important dans le futur.

Cette optimisation nécessite en premier lieu de bien connaître les quantités d'eau apportées à la parcelle, et en second lieu de spatialiser ces quantités à l'échelle du territoire. Or, ces quantités ou doses d'irrigation sont mal connues. Ceci est dû au fait que la quantité d'eau qui va s'infiltrer effectivement sur une parcelle est déterminée par l'interaction entre les principaux processus hydraulique dans ce système (infiltration et ruissellement) et la difficulté de quantifier cette dose apportée à l'échelle régionale de la Crau implique de développer une méthodologie permettant d'améliorer l'estimation de ces volumes.

Dans notre travail présenté au cours de cette thèse, on a développé un système numérique incluant un modèle d'irrigation gravitaire dénommé 'Calhy' (Bader et al., 2010) permettant de caractériser le fonctionnement des principaux processus intervenant dans ce système d'irrigation : l'infiltration de l'eau dans le profil du sol et la propagation à la surface de la parcelle. Ces processus peuvent être décrits par un système d'équations dont la résolution ou la précision est limitée par la connaissance de certains paramètres non ou difficilement mesurables, tels que la conductivité hydraulique à saturation du sol et le frottement hydraulique de la surface parcellaire. Nous avons montré comment estimer ces paramètres par une méthode inverse en combinant le modèle Calhy et un dispositif expérimental optimisé dans ce but. La démarche suivie a été la suivante :

- Analyser la sensibilité des variables opérationnelles du modèle Calhy permettant de calculer le bilan hydrique de l'irrigation aux différents paramètres du modèle afin de définir l'importance de chaque paramètre et la priorité de leur estimation.
- Analyser la sensibilité de variables intermédiaires du modèle (appelées « proxy-variables ») qui sont liées aux paramètres identifiés précédemment, qui se déduisent des variations de la hauteur d'eau à la surface de la parcelle et qui seraient facilement mesurables sur le terrain. Cette étape a permis de définir une configuration de mesure optimale vis-à-vis de l'estimation des paramètres sensibles du modèle.
- Concevoir le dispositif de mesures correspondant et le déployer sur un ensemble de parcelles sur la Crau afin d'estimer les paramètres de modèle Calhy en mettant en œuvre une méthode inverse..

Les résultats obtenus montrent que la méthodologie proposée est robuste et efficace pour estimer les paramètres hydrauliques d'irrigation gouvernant l'infiltration et la propagation de l'eau au cours de l'irrigation.

La connaissance du fonctionnement de système d'irrigation gravitaire à l'aide du modèle Calhy après la détermination de ces paramètres, nous a ensuite permis d'analyser les pratiques actuelles d'irrigation et de proposer des voies d'optimisation sur ce système de l'irrigation. Nous avons étudié différentes modifications du système d'irrigation actuel telles que des changements sur la pente de la parcelle, sur le sens d'irrigation, sur la fragmentation de l'apport d'eau en différents points de la parcelle, Nous avons, quantitativement ou qualitativement, étudié l'impact de ces modifications sur l'homogénéité de l'infiltration, le temps de travail.

Les perspectives d'utilisation de cette méthodologie sont de déployer notre modèle sur toute la région de la Crau afin de spatialiser les doses et les flux de recharge.

Cela permettra d'intégrer ce modèle au simulateur de la Crau afin d'améliorer les précisions d'estimation du bilan hydrique. Cette étape nécessite cependant de connaître précisément les calans sur l'ensemble de la Crau et suppose que les pratiques d'irrigation sont homogènes sur l'ensemble des parcelles et exploitations, ce qui est une forte hypothèse.

Nous avons aussi mis en œuvre de façon parallèle une autre démarche afin d'établir un modèle empirique de dose d'irrigation basé sur l'analyse des pratiques d'irrigation au sein de

diverses exploitations réparties sur tout le territoire de la Crau. Nous avons procédé à des enquêtes chez les agriculteurs. Sur la base des données recueillies, nous avons développé différents modèles empiriques basés sur des régressions calculant la dose d'irrigation et la durée en fonction du débit disponible et des paramètres parcellaires caractérisant les conditions d'irrigation tels que la géométrie de la parcelle (longueur, largeur et surface).

Le modèle de dose empirique investigué au cours de ce travail permet de fournir une estimation de la dose distribuée sur tout le territoire de la Crau en intégrant ce modèle dans le simulateur de la Crau. Là aussi, cela suppose de connaître l'ensemble des calans sur la Crau et de connaître précisément les calendriers d'irrigations. Cependant l'analyse et la modélisation des calendriers d'irrigation semblent complexes.

Les perspectives de ce travail sont les suivantes :

- l'analyse et la modélisation des calendriers d'irrigation semble la prochaine étape importante. Cette modélisation doit prendre en compte les comportements des agriculteurs et pas uniquement les droits d'eau et les caractéristiques des parcelles agricoles,
- la méthodologie d'estimation des paramètres peut être utilisée comme une façon de réaliser une carte de propriétés du sol sur les différentes zones géologiques et les différents types du sol présents sur la Crau, ainsi que sur n'importe quel territoire et parcelles dès que le système d'irrigation est similaire à celui présent sur la Crau,
- il semble également important d'expliquer la variabilité des paramètres hydrauliques et pédologiques obtenus par inversion, afin de pouvoir se passer du processus d'inversion dans les étapes futures. Relier le coefficient de frottement hydraulique à différents descripteurs de l'état de la végétation (composition floristique, densité, stade de développement, LAI, ...) permettrait de calculer ce coefficient en continu et pour différents couverts. Ceci est un champ de recherche dans le domaine de l'hydraulique, de l'agronomie et de l'hydrologie, mais la prise en compte de couverts hétérogènes (comme c'est le cas pour les prairies plurispécifiques de la Crau) reste un challenge. Il serait également intéressant de comparer les paramètres du sol obtenus par inversion (conductivité hydraulique à saturation, capacité de réserve en eau du sol) à d'autres estimations basées par exemple sur des fonctions de pédotransfert.
- Approfondir la question de l'optimisation de l'irrigation. Le modèle de l'irrigation proposé et ses choix d'optimisations pourront être utilisés pour d'autres zones cultivées par d'autre culture (prairie ou verger) et ayant d'autre type du sol (sol limoneux ou argileux, teneur moins ou plus importante des cailloux à la surface du sol) afin d'aider les producteurs agricoles à gérer l'irrigation et aménager leurs exploitations. Il faudra

cependant quantifier plus précisément l'impact de ces optimisations et définir d'autres critères d'analyse.

Références :

- Álvarez-Mozos, J., Campo, M.Á., Giménez, R., Casali, J., Leibar, U., 2011. Implications of scale, slope, tillage operation and direction in the estimation of surface depression storage. *Soil Tillage Res.* 111, 142–153. doi:10.1016/j.still.2010.09.004
- Amoah, J.K.O., Amatya, D.M., Nnaji, S., 2013. Quantifying watershed surface depression storage: determination and application in a hydrologic model. *Hydrol. Process.* 27, 2401–2413. doi:10.1002/hyp.9364
- Ancey, C., 2010. *Hydraulique à surface libre. Phenomenes Propag. Ondes Ruptures Barrage Bases Math. Outils Simul. Appl. Notes Cours Version 2.*
- Andrieux, P., 1981. *Etude des sols du Domaine du Merle-Méthodes et premiers résultats. Mém. D'ingénieur Ecole Natl. Supér. Agron. Montp. Montp.* 46p.
- Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J.-P., Roulier, S., Thony, J.-L., Gaudet, J.-P., Vauclin, M., 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. *Soil Tillage Res.* 55, 1–29.
- ANTEA, 2001. *Etude des prélèvements d'eau en nappe de Crau - Rapport de fin d'étude. Etude commandée par la DDAF 13, n°A21566 Version A.*
- Austin, N.R., Prendergast, J.B., Malano, H.M., McMahon, T.A., 1996. The role of pasture height in border irrigation modelling. *Agric. Eng. Aust.* 25, 86.
- Bader, J.C., Saos, J.L., Charron, F., 2010. Model of border irrigation runoff, advance and infiltration on a soil covering a very permeable subsoil. *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.* 55, 177–191. doi:10.1080/02626660903546050
- Baillieux, A., Oliosio, A., Trolard, F., Chanzy, A., Lecerf, R., Lecharpentier, P., Banton, O., Ruget, F., Ruy, S., 2015. Changements globaux: quels impacts sur l'aquifère de la Crau ? *Géologues* 85–92.
- Balland, P., Huet, P., A, Pierre, 2002. *Rapport sur la Durance - Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention, de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance, Contribution à un Plan Durance. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère délégué à l'Industrie, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires Rurales, Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, Paris.*
- Ballihaut, C., 2009. *Caractérisation de la pratique de l'irrigation en plaine de la CRAU, de la parcelle à l'échelle de la Plaine. (Rapport de stage M1 Hydrologie, Sol et Environnement, 49 p). <http://prodinra.inra.fr/record/48302>*
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., 2009a. Optimal and Postirrigation Volume Balance Infiltration Parameter Estimates for Basin Irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135, 579–587. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000018
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Schlegel, J., 2009b. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agric. Water Manag.* 96, 1146–1154. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.007
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Schlegel, J., 2009c. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agric. Water Manag.* 96, 1146–1154. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.007
- Bautista, E., Schlegel, J.L., Strelkoff, T.S., 2012. *WinSRFR 4.1 User Manual. https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/20200515/WinSRFR4_UserManual.pdf*
- Bautista, E., Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., 2012. Improved Surface Volume Estimates for Surface Irrigation Volume-Balance Calculations. *J. Irrig. Drain. Eng.-Asce* 138, 715–726. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000461
- Beltrando, G., 2015a. La plaine de la Crau (ouest de la Provence), un territoire aux enjeux socio-économiques et écologiques en mutation. *Cybergeo Eur. J. Geogr.*
- Beltrando, G., 2015b. *GROUNDWATER IN THE PLAIN OF THE CRAU (SOUTH-EAST OF FRANCE): BETWEEN HISTORICAL ABUNDANCE AND MODERN VULNERABILITY.*
- Benami, A., Ofen, A., others, 1983. *Irrigation engineering. Sprinkler, trickle, surface irrigation principles and agricultural practices. Irrigation Engineering Scientific Publications.*

- Benham, B.L., Reddell, D.L., Marek, T.H., 2000. Performance of three infiltration models under surge irrigation. *Irrig. Sci.* 20, 37–43. doi:10.1007/s002710000020
- Bessonnet, N., 2002. Impact De L'irrigation Gravitaire Sur La Recharge De La Nappe De Crau (rapport de stage).
- Beven, K., Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Process.* 6, 279–298.
- Beven, K., Germann, P., 2013. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resour. Res.* 49, 3071–3092.
- Bouteyre, G., Duclos, G., 1994. Carte pédologique de la France à 1/100 000. Feuille Arles INRA.
- Bouttier, F., Courtier, P., 2002. Data assimilation concepts and methods March 1999. *Meteorol. Train. Course Lect. Ser. ECMWF.*
- Branquinho, P., 2011. Influence de la phase caillouteuse sur les propriétés physiques, hydriques et sur les écoulements dans un coussoul de Crau. Rapport M1 Hydrogéologie Sol et Environnement, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse.
- BRGM, 1995, MARTCRAU : Actualisation du modèle de la nappe de la Crau. Etude commandée par la DIREN et la DRIRE PACA, R 38199
- BRGM, 1996, Surveillance de la qualité des eaux de la plaine de la Crau. Observations effectuées en 1995 (1996-2001) URL <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-39205-FR.pdf>
- Bruinsma, J., 2009. The resource outlook to 2050, in: *Expert Meeting on How to Feed the World* in pp. 1–33.
- Buis, S., Wallach, D., Guillaume, S., Varella, H., Lecharpentier, P., Launay, M., Guérif, M., Bergez, J.-E., Justes, E., 2011. The STICS Crop Model and Associated Software for Analysis, Parameterization, and Evaluation. *Methods Introd. Syst. Models Agric. Res.* 395–426.
- Bulot, A., Provost, E., Dutoit, T., 2014. Transférer le sol pour restaurer des communautés végétales: quelles leçons pour mesurer la résilience des pelouses sèches ? (Plaine de La Crau, Sud-Est de la France). *Acta Bot. Gallica* 161, 287–300. doi:10.1080/12538078.2014.906920
- Cahoon, J., 1998. Kostiakov infiltration parameters from kinematic wave model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 124, 127–130.
- Charnes, A., Frome, E.L., Yu, P.-L., 1976. The equivalence of generalized least squares and maximum likelihood estimates in the exponential family. *J. Am. Stat. Assoc.* 71, 169–171.
- Cheyran, G., 1998. Evolution du milieu naturel et du peuplement ornithologique. *Patrim. Nat. Prat. Pastor. En Crau Pour Une Gest. Glob. Laplaine CEEP Aix-En-Provence* 10–12.
- Chossat, J.-C., 2005. La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols: choix des méthodes. Éd. Tec & doc.
- Cibin, R., Sudheer, K.P., Chaubey, I., 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrol. Process.* 24, 1133–1148.
- Clémentz, M., 1999. Les effets induits de l'irrigation gravitaire sur la nappe alluviale et le système hydrographique naturel. Etude dans le périmètre irrigué du canal Saint-Julien. DESS Hydrogéologie et Environnement, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Clemmens, A., Bautista, E., 2009. Toward Physically Based Estimation of Surface Irrigation Infiltration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135, 588–596. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000092
- Clemmens, A.J., 2009. Errors in Surface Irrigation Evaluation from Incorrect Model Assumptions. *J. Irrig. Drain. Eng.-Asce* 135, 556–565. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000059
- Clemmens, A.J., 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agric. Water Manag.* 3, 251–267. doi:10.1016/0378-3774(81)90010-X
- Clemmens, A.J., Eisenhauer, D.E., Maheshwari, B.L., 1998. Infiltration and roughness equations for surface irrigation: How form influences estimation, in: *2001 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, p. 1.
- Comité de foin de Crau., 2001. Site : <http://foindecrau.com/> et Brochures : <http://lapinsdamour.free.fr/lapin/wp-content/uploads/2010/08/artfoin.pdf>
- Contrat de Crau-sud Alpilles. Site : <http://contratdecanaalcrausudalpillles.over-blog.com/>
- Collis-George, N., 1977. Infiltration equations for simple soil systems. *Water Resour. Res.* 13, 395–403.

- Cognard-Plancq, A.L., Gillon, M., Babic, M., Simler, R., Daniel, M., 2014. Fonctionnement hydrodynamique de la nappe de la Crau: Approche chimique et isotopique. Colloque International SICMED, Gammarth (TUN), 18-20/11/2014. <http://www.sicmed.net/#/colloque-sicmed-2014/4551722>.
- Cukier, R.I., Fortuin, C.M., Shuler, K.E., Petschek, A.G., Schaibly, J.H., 1973. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I Theory. *J. Chem. Phys.* 59, 3873–3878.
- Cukier, R.I., Schaibly, J.H., Shuler, K.E., 1975. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. III. Analysis of the approximations. *J. Chem. Phys.* 63, 1140–1149.
- Dages, C., Voltz, M., Bsaibes, A., Prévot, L., Huttel, O., Louchart, X., Garnier, F., Negro, S., 2009. Estimating the role of a ditch network in groundwater recharge in a Mediterranean catchment using a water balance approach. *J. Hydrol.* 375, 498–512.
- Davis, C.A., Collins, H.G., Portland, O.R., Woodward, G., Humpherys, A.S., Hart, W.E., 1980. Design and operation of farm irrigation systems. *Am. Soc. Agric. Eng. Mich. USA*.
- De Montety, V., 2008. Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque-Cas de la Camargue (delta du Rhône, France). Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, FRA). <http://prodinra.inra.fr/record/250253>.
- De Mordant De Massiac, J.-C., Trolard, F., Bourrié, G., 2011. Anticipation Sécurisée des Territoires Urbanisés, des Campagnes et de leur Environnement fondée sur les nouvelles Technologies de l'Information et des Communications (Astuce & Tic) Rapport final.
- Degoutte, G., n.d. Aide mémoire d'hydraulique à surface libre. <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/COURSDHYDRAULIQUEDYN/document/Texte%20de%20cours/degoutte1.pdf?cidReq=COURSDHYDRAULIQUEDYN>
- Devaux, J.P., Archiloque, A., Borel, L., Bourrelly, M., Louis-Palluel, J., 1983. Notice de la carte phytogéologique de la Crau (Bouches du Rhône). *Biol. Écologie Méditerranéenne* 10, 5–54.
- Di Pietro, L., Ruy, S., Capowiez, Y., 2003. Predicting preferential water flow in soils by traveling-dispersive waves. *J. Hydrol.* 278, 64–75.
- Djouabi, F., 2004. Diagnostic territorial et environnemental des périmètres irrigués gérés par les associations syndicales de la plaine de Crau-Contribution à l'adaptation d'un modèle de gestion et d'allocation de la ressource en eau: IRMA. Master Dév. Rural Proj. IAMM Montp. 273p.
- Dutoit, T., Buisson, E., Fadda, S., Henry, F., Coiffait-Gombault, C., Jaunatre, R., 2011. Dix années de recherche dans une pseudo-steppe méditerranéenne: impacts des changements d'usage et restauration écologique. *Sci. Chang. PlanétairesSécheresse* 22, 75–85.
- Ebrahimian, H., 2014. Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. *KSCE J. Civ. Eng.* 18, 1904–1911. doi:10.1007/s12205-014-1343-z
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Ghanbarian-Alavijeh, B., Abbasi, F., 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrig. Sci.* 28, 479–488. doi:10.1007/s00271-010-0209-5
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., others, 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil Water Res* 6, 91–101.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, Belaud, G., Cheviron, B., Courault D., Hagolle O. Charron F. (2016) Soil moisture retrieval over irrigated grassland using X-band SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 176, 202-218
- Elliott, R.L., Walker, W.R., 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions [irrigation; Colorado]. *Trans. ASAE Am. Soc. Agric. Eng.*
- Elliott, R.L., Walker, W.R., Skogerboe, G.V., 1983. Infiltration parameters from furrow irrigation advance data. *Trans. Asae* 26, 1726–1731.
- Engman, E.T., 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112, 39–53.
- FAO, 2016. AQUASTAT Main Database, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

- FAO, 2011. Irrigation areas, irrigated crops, environment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
- FAO-UNESCO, 1981. Soil map of the world – 1/5.000.000. Food and Agricultural Organisation, Rome.
- Fiedler, F.R., Ramirez, J.A., 2000. A numerical method for simulating discontinuous shallow flow over an infiltrating surface. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 32, 219–239.
- Foglia, L., Hill, M.C., Mehl, S.W., Burlando, P., 2009. Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resour. Res.* 45.
- Galbiati, G., Savi, F., 1995. Evaluation of the comparative influence of soil hydraulic properties and roughness on overland flow at the local scale. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 183–190.
- García Díaz, R., 2005. Analysis of Manning coefficient for small-depth flows on vegetated beds. *Hydrol. Process.* 19, 3221–3233.
- Gardner, W.R., 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 20, 317–320.
- Gilley, J.E., Kottwitz, E.R., Wieman, G.A., 1991. Roughness coefficients for selected residue materials. *J. Irrig. Drain. Eng.* 117, 503–514.
- Gillies, M.H., Smith, R.J., 2015. SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. *Irrig. Sci.* 33, 339–355.
- Gillies, M.H., Smith, R.J., 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrig. Sci.* 24, 25–35. doi:10.1007/s00271-005-0004-x
- Gillies, M.H., Smith, R.J., Raine, S.R., 2006. Accounting for temporal inflow variation in the inverse solution for infiltration in surface irrigation. *Irrig. Sci.* 25, 87–97. doi:10.1007/s00271-006-0037-9
- Gillon, M., Cognard-plancq, A., Marc, V., Nofal, S., Travi, Y., Babic, M., Daniel, M., Simler, R., Tison, F., 2015. How much do human activities influence shallow groundwater recharge? An example of using isotope lumped parameters models to investigate the impact of irrigation practices in two Mediterranean alluvial aquifers (IAEA-CN-225/126p). Presented at the International symposium on Isotope Hydrology, revisiting foundations and exploring frontiers, Vienna, Austria.
- Green, W.H., Ampt, G.A., 1911. Studies on soil physics: I. The flow of air and water through soils. *J. Agric Sci* 4, 124 Jonckheere.
- Grigorjev, V.Y., Iritz, L., 1991. Dynamic simulation model of vertical infiltration of water in soil. *Hydrol. Sci. J.* 36, 171–179.
- Guérin, C., Scholl, P., Léonhard, S., 2009. Diagnostic qualitatif/quantitatif et analyse de l'évolution des risques sur la nappe de la Crau (Rapporte de synthèse, GINGER ENVIRONNEMENT.). SymCrau.
- Harun-ur-Rashid, M., 1990. Estimation of Manning's roughness coefficient for basin and border irrigation. *Agric. Water Manag.* 18, 29–33.
- Henry, F., Talon, B., Dutoit, T., 2010. The age and history of the French Mediterranean steppe revisited by soil wood charcoal analysis. *The Holocene* 20, 25–34.
- Hessel, R., Jetten, V., Guanghui, Z., 2003. Estimating Manning's n for steep slopes. *Catena* 54, 77–91.
- Holtan, H.N., others, 1961. Concept for infiltration estimates in watershed engineering.
- Horton, R.E., 1939. The interpretation and application of runoff plot experiments with reference to soil erosion problems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 3, 340–349.
- Houero, H.N. le, 1981. Impact of man and his animals on Mediterranean vegetation. *Ecosyst. World* 11 Mediterr.-Type Shrublands 479–521.
- Huggins, L. F. and Monke, E. J., The Mathematical Simulation of the Hydrology of Small Watersheds" (1966). IWRRRC Technical Reports. Paper 2. <http://docs.lib.purdue.edu/watertech/2>
- ICF Environnement, 2009. Rapport n° AIX-09-098-IL F V1. Synthèse géologique et hydrogéologique. Evaluation quantitative de l'impact sur la ressource en eau. 109 pp.
- Igboekwe, M.U., Adindu, R.U., 2014. Use of Kostikov's Infiltration Model on Michael Okpara University of Agriculture, Umudike Soils, Southeastern, Nigeria. *J. Water Resour. Prot.* 6, 888. doi:10.4236/jwarp.2014.610083

- looss, B., Lemaître, P., 2015. A review on global sensitivity analysis methods, in: *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems*. Springer, pp. 101–122.
- Juliand J. 2011. Caractérisation du fonctionnement hydrique d'un sol de Crau sous prairie irriguée. Rapport M1 Hydrogéologie Sol et Environnement, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse.
- Kamphorst, E.C., Duval, Y., 2001. Validation of a numerical method to quantify depression storage by direct measurements on moulded surfaces. *Catena* 43, 1–14.
- Kamphorst, E.C., Jetten, V., Guérif, J., Iversen, B.V., Douglas, J.T., Paz, A., others, 2000. Predicting depression storage from soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1749–1758.
- Katopodes, N., Tang, J., Clemmens, A., 1990. Estimation of Surface Irrigation Parameters. *J. Irrig. Drain. Eng.* 116, 676–696. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:5(676)
- Khanna, M., Malano, H.M., 2006. Modelling of basin irrigation systems: A review. *Agric. Water Manag.* 83, 87–99. doi:10.1016/j.agwat.2005.10.003
- Kidwell, M.R., Wertz, M.A., Guertin, D.P., 1997. Estimation of Green-Ampt effective hydraulic conductivity for rangelands. *J. Range Manag.* 290–299.
- Kim, J., Ivanov, V.Y., Katopodes, N.D., 2012. Hydraulic resistance to overland flow on surfaces with partially submerged vegetation. *Water Resour. Res.* 48.
- Kostiakov, A.N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans* 6, 17–21.
- Kutílek, M., Nielsen, D.R., others, 1994. *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines*. Catena Verlag.
- Lacroix, M., 1991. Impact de l'irrigation sur un aquifère alluvial. *Dynamique du système Basse Durance*. Université de Franche-Comté.
- Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Ugalde, J.M.S., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 521–532. doi:10.2136/sssaj2005.0026
- Lebeau, M., Konrad, J.-M., 2010. A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 46.
- Lee, T.S., Walker, W.R., 1993. Evaluation of Infiltration in Furrow Irrigation Part 2: Basic Infiltration Rate. *Pertanika J. Sci. Technol.* 1, 119–124.
- Li, Z., Zhang, J.T., 2001. Calculation of field Manning's roughness coefficient. *Agric. Water Manag.* 49, 153–161. doi:10.1016/s0378-3774(00)00139-6
- Lionel, A., Purpan, E., 2004. Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en zone de Crau: Calibration d'un modèle mathématique de gestion de l'irrigation (rapport de stage).
- Ma, D., Doussan, C., Charon, F., Di Pietro, L., Olioso, A., Chapelet, A., 2011. Caractérisation de la recharge de la nappe à l'échelle parcellaire par l'irrigation par submersion : Une approche couplée Hydrologie - Géophysique, in: *ÉCHANGES HYDRIQUES ET GAZEUX & HYDROGÉOPHYSIQUE*. Presented at the MILIEUX POREUX ET GÉOPHYSIQUE, Orléans, France.
- Maheshwari, B.L., McMahan, T.A., 1993. Performance evaluation of border irrigation models for south-east Australia: Part 2, Overall suitability for field applications. *J. Agric. Eng. Res.* 54, 127–139.
- Mailapalli, D.R., Wallender, W.W., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., 2008. Quick method for estimating furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134, 788–795.
- Mailhol, J., 2003. Validation of a Predictive Form of Horton Infiltration for Simulating Furrow Irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129, 412–421. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:6(412)
- Mailhol, J.C., Merot, A., 2008. SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region. *Irrig. Sci.* 26, 289–302.
- Makowski, D., Naud, C., Jeuffroy, M.-H., Barbottin, A., Monod, H., 2006. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91, 1142–1147. doi:10.1016/j.res.2005.11.015
- Makowski, D., Wallach, D., Tremblay, M., 2002. Using a Bayesian approach to parameter estimation; comparison of the GLUE and MCMC methods. *Agron.-Sci. Prod. Veg. Environ.* 22, 191–204.

- Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 11, 431–441.
- Martin, E., 2008. Aspects économiques de gestion de l'eau souterraine. Aix Marseille 2.
- Mein, R.G., Larson, C.L., 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour. Res.* 9, 384–394.
- Merot, A., 2007. Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué - Application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de l'élaboration d'un Outil d'Aide à la Décision. Thèse de doctorat, SupAgro, Montpellier, France, 207p.
- Merot, A., Bergez, J.-E., Capillon, A., Wery, J., 2008a. Analysing farming practices to develop a numerical, operational model of farmers' decision-making processes: An irrigated hay cropping system in France. *Agric. Syst.* 98, 108–118.
- Mérot, A., Bergez, J.-E., Wallach, D., Duru, M., Charron, F., Capillon, A., Wéry, J., Isbérie, C., Mailhol, J.-C., 2011. Gestion de l'eau en Crau Comment s'adapter aux tensions sur la ressource en eau à l'échelle des exploitations agricoles. *Sciences Eaux & Territoires, la revue du CEMAGREF, Hors-série n°2, 1-7* URL <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/65/61/51/PDF/dg2011-pub00034829.pdf>
- Merot, A., Wery, J., Isberie, C., Charron, F., 2008. Response of a plurispécific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *Eur. J. Agron.* 28, 8–18.
- Merriam, J.L., Clemmens, A.J., 1985. Time rated infiltrated depth families, in: *Development and Management Aspects of Irrigation and Drainage Systems*. ASCE, pp. 67–74.
- Michel, J., 2011. *Les Architectes de l'eau en Provence*, Actes Sud. ed. Arles (France). ISBN 978-2-7427-9710-3
- Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E., 2012. Facing climatic and anthropogenic changes in the Mediterranean basin: What will be the medium-term impact on water stress? *Comptes Rendus Geosci.* 344, 432–440.
- Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E., Fritsch, J.-M., Ardoin-Bardin, S., Thivet, G., 2013. Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes. *Hydrol. Sci. J.* 58, 498–518.
- Mishra, S., 2009. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for hydrologic modeling. *J. Hydroinformatics* 11, 282–296.
- Mishra, S.K., Tyagi, J.V., Singh, V.P., 2003. Comparison of infiltration models. *Hydrol. Process.* 17, 2629–2652. doi:10.1002/hyp.1257
- Mohammed, G., Trolard, F., Bourrié, G., Gillon, M., Tronc, D., Charron, F., 2016. A Long-Term Data Sequence (1960-2013) to Analyse the Sustainability of Hay Quality in Irrigated Permanent Grasslands Under Climate Change. *Am. J. Agric. For.*
- Moore, I.D., Larson, C.L., others, 1980. An infiltration-runoff model for cultivated soils. *Trans. ASAE* 23, 1460–1467.
- Moravejalakhani, B., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., Abbasi, F., 2009. Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. *Biosyst. Eng.* 103, 374–381. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.04.005
- Morel-Seytoux, H.J., 2012. *Unsaturated flow in hydrologic modeling: theory and practice*. Springer Science & Business Media. ISBN 940092352X, 9789400923522
- Morris, E.M., Woolhiser, D.A., 1980. Unsteady one-dimensional flow over a plane: Partial equilibrium and recession hydrographs. *Water Resour. Res.* 16, 355–360.
- Moussa, R., Bocquillon, C., 1996. Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation. *Hydrol. Process.* 10, 105–123.
- Nelder, J.A., Mead, R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *Comput. J.* 7, 308–313. doi:10.1093/comjnl/7.4.308
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W., Erh, K.T., 1973. *Spatial variability of field-measured soil-water properties*. University of California, Division of Agricultural Sciences.

- Nofal, S., Blavoux, B., Cognard-Plancq, A., Marc, V., Travi, Y., 2015. L'approvisionnement en eau potable de la ville d'Avignon Impact de l'urbanisation sur la nappe alluviale au confluent Rhône - Durance. *Géologues* 167 : 61-64.
- Oliosio, A., Lecerf, R., Baillieux, A., Chanzy, A., Ruget, F., Banton, O., Lecharpentier, P., Trolard, F., Cognard-Plancq, A.-L., 2013. Modelling of Drainage and Hay Production over the Crau Aquifer for Analysing Impact of Global Change on Aquifer Recharge. *Procedia Environ. Sci.* 19, 691–700. doi:10.1016/j.proenv.2013.06.078
- Oliosio, A., Lecerf, R., Chanzy, A., Ruget, F., Huard, F., Baillieux, A., Rosselo, P., Lecharpentier, P., Trolard, F., Charon, F., Ruy, S., ALKASSEM ALOSMAN, M., Cognard-Plancq, A.-L., Seguin, B., Courlaut, D., Gallego-Elvira, B., Garrigues, S., 2013b. Bilan hydrique des agrosystèmes de Crau face aux changements globaux. Paris, France.
- Pantelakis, D., Zissis, T., Anastasiadou-Partheniou, E., Baltas, E., 2011. Numerical Models for the Simulation of Overland Flow in Fields Within Surface Irrigation Systems. *Water Resour. Manag.* 26, 1217–1229. doi:10.1007/s11269-011-9955-2
- Paz-Ferreiro, J., Bertol, I., Vidal Vázquez, E., 2008. Quantification of tillage, plant cover, and cumulative rainfall effects on soil surface microrelief by statistical, geostatistical and fractal indices. *Nonlinear Process. Geophys.* 15, 575–590.
- Pernès, P., 2004. *Hydraulique unidimensionnelle: Coups de bélier et phénomènes d'oscillation en masse, pompes centrifuges.* CEMAGREF Editions.
- Peschke, G., Kutílek, M., 1982. Infiltration model in simulated hydrographs. *J. Hydrol.* 56, 369–379. doi:10.1016/0022-1694(82)90023-3
- Peyre, M., 1927. Les irrigations de la basse Durance, in: *Annales de Géographie.* JSTOR, pp. 40–57.
- Philip, J.R., 1969. Moisture equilibrium in the vertical in swelling soils. I. Basic theory. *Soil Res.* 7, 99–120.
- Plan bleu ., 2005. Plan bleu environnement et développement en Méditerranée Site : <http://planbleu.org/>
- Qin, D., Qian, Y., Han, L., Wang, Z., Li, C., Zhao, Z., 2011. Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. *J. Hydrol.* 405, 194–208.
- Rasoulzadeh, A., Sepaskhah, A.R., 2003. Scaled Infiltration Equations for Furrow Irrigation. *Biosyst. Eng.* 86, 375–383. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.07.004
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1989. Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties, in: Morel-Seytoux, H.J. (Ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, pp. 275–300.
- Ree, W.O., 1949. Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways. *Agric. Eng.* 30, 184–189.
- Richards, L.A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous mediums". *Physics.* 1 (5): 318–333. Bibcode:1931Physi...1..318R. doi:10.1063/1.1745010
- Rigaud, S., Shahzad, T., 2007. Fonctionnement de la nappe de la crau (Rapport de stage, Master 2 Recherche, Science de l'Environnement Terrestre, Spécialité « Géosystèmes »).
- Risse, L.M., Nearing, M.A., Savabi, M.R., 1994. Determining the Green-Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model. *Trans. ASAE* 37, 411–418.
- Robertson, D., Wood, M., Wang, Q.J., 2004. Estimating hydraulic parameters for a surface irrigation model from field conditions. *Aust. J. Exp. Agric.* 44, 173–179. doi:10.1071/ea02191
- Robinson, D.A., Friedman, S.P., 2003. A method for measuring the solid particle permittivity or electrical conductivity of rocks, sediments, and granular materials. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 108.
- Saltelli, A., Bolado, R., 1998. An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST). *Comput. Stat. Data Anal.* 26, 445–460.
- Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M., others, 2000a. *Sensitivity analysis.* Wiley New York.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., 2000b. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Stat. Sci.* 377–395.
- Saos, J.-L., 2003. Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en Crau (Rapport d'avancement No. 1).

- Saos, J.-L., Belaud, G., Charron, F., Le Goulven, P., 2006. Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en Crau (Rapport finale). UMR G-Eau—Supagro, Montpellier.
- Saucedo, H., Fuentes, C., Zavala, M., 2005. The Saint-Venant and Richards equation system in surface irrigation: numerical coupling for the advance phase in border irrigation. *Ing. Hidraul. En Mex.* 20, 109–119.
- Sedaghatdoost, A., Ebrahimian, H., 2015. Calibration of infiltration, roughness and longitudinal dispersivity coefficients in furrow fertigation using inverse modelling with a genetic algorithm. *Biosyst. Eng.* 136, 129–139.
- Seraphin, P., Vallet-Coulomb, C., Gonçalves, J., 2015. Groundwater mass balance of the Crau aquifer estimated through a stable isotope-mixing model ($\delta^{18}O$, δ^2H). Presented at the Sicmed, Marseille.
- Shepard, J.S., Wallender, W.W., Hopmans, J.W., 1993. One-point method for estimating furrow infiltration. *Trans. ASAE USA.*
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J.-M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F.T., 2010. Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1863–1880.
- Singh, V.P., 1996. Kinematic wave modeling in water resources, surface-water hydrology. John Wiley & Sons.
- Singh, V.P., Yu, F.X., 1990. Derivation of infiltration equation using systems approach. *J. Irrig. Drain. Eng.* 116, 837–858.
- Skaggs, R.W., Khaleel, R., 1982. Infiltration. *Hydrol. Model. Small Watersheds ASAE Monogr* 5, 121–166.
- Smith, R.E., 1972. The infiltration envelope: Results from a theoretical infiltrometer. *J. Hydrol.* 17, 1–22. doi:10.1016/0022-1694(72)90063-7
- Smith, R.E., Parlange, J.-Y., 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resour. Res.* 14, 533–538. doi:10.1029/WR014i003p00533
- Sobol, I.M., 2001. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Math. Comput. Simul.* 55, 271–280.
- SOGREAH, 2010. Schéma d'orientations pour une utilisation raisonnée et solidaire de la ressource en eau (Rapport de diagnostic).
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., 2007. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007, GIEC 2007 - Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., Xu, C., 2015. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *J. Hydrol.* 523, 739–757. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.02.013
- Strelkoff, T., Clemmens, A., Bautista, E., 2009. Estimation of Soil and Crop Hydraulic Properties. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135, 537–555. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000088
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., 2007. Hydraulics of surface systems. *Des. Oper. Farm Irrig. Syst. J Hoffman AI.*
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., 1994. DIMENSIONAL ANALYSIS IN SURFACE IRRIGATION. *Irrig. Sci.* 15, 57–82.
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., Schmidt, B.V., Slosky, E.J., 1996. BORDER—a design and management aid for sloping border irrigation systems. WCL Report 21. US Dep. Agric. Agric. Res. Serv. US Water Conserv. Lab. Phoenix AZ.
- SymCrau, 2014., Synthèse du diagnostic et des enjeux de la nappe de Crau contrat de nappe. Synthèse réalisée par les bureaux d'études accompagnant le SYMCRAU, 51 p. <http://symcrau.com/>.
- SymCrau, 2012. Suivi piézométrique de la nappe de la Crau.
- Taskinen, A., Bruen, M., 2007. Incremental distributed modelling investigation in a small agricultural catchment: 1. Overland flow with comparison with the unit hydrograph model. *Hydrol. Process.* 21, 80–91.
- Tayfur, G., Kavvas, M.L., Govindaraju, R.S., Storm, D.E., 1993. Applicability of St. Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltrating surfaces. *J. Hydraul. Eng.* 119, 51–63.

- Timlin, D., Pachepsky, Y., Walthall, C., Loechel, S., 2001. The use of a water budget model and yield maps to characterize water availability in a landscape. *Soil Tillage Res.* 58, 219–231.
- Tiscareno-Lopez, M., Lopes, V.L., Stone, J.J., Lane, L.J., 1993. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications I: Hillslope processes. *Trans. ASAE* 36, 1659–1672.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574–582.
- Tourmetz, K., 2010. Détermination des doses d'irrigation et leurs influences sur la recharge de la nappe (rapport de stage, M2).
- Trolard, F., Reynders, S., Dangeard, M.-L., Bourrié, G., Descamps, B., Keller, C., de Mordant, J.-C., 2012. La résilience des territoires aux changements globaux: Quelle démarche? Quelles perspectives?
- Turner, A.K., Chanmeesri, N., 1984. Shallow flow of water through non-submerged vegetation. *Agric. Water Manag.* 8, 375–385.
- Turner, A.K., Clift, T.R., Win, M., Langford, K.J., 1978. Discharge-depth equation for shallow flow. *J. Irrig. Drain. Div.* 104, 95–110.
- Valiantzas, J., 1993. Border Advance Using Improved Volume-Balance Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 119, 1006–1013. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:6(1006)
- Valiantzas, J.D., Aggelides, S., Salsalou, A., 2001. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agric. Water Manag.* 52, 17–32.
- Valipour, M., 2012. Comparison of surface irrigation simulation models: full hydrodynamic, zero inertia, kinematic wave. *J. Agric. Sci.* 4, 68.
- Varella, H., Buis, S., Launay, M., Guérif, M., 2012. Global sensitivity analysis for choosing the main soil parameters of a crop model to be determined. *Agric. Sci.* 3, 949.
- Varella, H., Guérif, M., Buis, S., 2010. Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation: The case of soil parameters and a crop model. *Environ. Model. Softw.* 25, 310–319.
- Vieira, J.D., 1983. Conditions governing the use of approximations for the Saint-Venant equations for shallow surface water flow. *J. Hydrol.* 60, 43–58.
- Walker, W.R., 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131, 129–136.
- Walker, W.R., 2003. SIRMOD III: Surface irrigation simulation, evaluation and design. Guide Tech. Doc. Dep. Biol. Irrig. Eng. Utah State Univ. Logan UT USA.
- Wang, J.R., Schmugge, T.J., 1980. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. On* 288–295.
- Wang, W., Jiao, X., Peng, S., Ma, H., 2007. Linear regression approach for estimating soil infiltration parameters of border irrigation [J]. *J. Hydraul. Eng.* 4, 13.
- Weibo, N., Liangjun, F., Xiaoyi, M., 2012. Estimated Infiltration Parameters and Manning Roughness in Border Irrigation. *Irrig. Drain.* 61, 231–239. doi:10.1002/ird.624
- Wilson, C., 2007. Flow resistance models for flexible submerged vegetation. *J. Hydrol.* 342, 213–222.
- Wolff, A., 2010. Réserve naturelle des coussouls de Crau, plan de gestion 2010-2014, Section A : diagnostic et enjeux. Version définitive validée le 16/08/2010.
- Wu, F.-C., Shen, H.W., Chou, Y.-J., 1999. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. *J. Hydraul. Eng.* 125, 934–942.

Annexes

Annexe (1). Analyse de sensibilité préalable des proxys variables de modèle Calhy aux cinq paramètres d'entrée.

A partir de l'évolution temporelle de la hauteur lame d'eau à la surface du sol, trois proxys variables ont été définis comme suivant :

- H_{max} (mm) représente la hauteur maximum de la lame d'eau au cours de l'irrigation,
- T_{arrive} (h) identifie le temps nécessaire pour que la lame d'eau arrive à telle abscisse,
- T_{propag} (h) représente le temps de propagation de la lame d'eau d'une abscisse à l'autre : c'est la différence entre deux valeurs successives de T_{arriv} .

L'évolution de ces proxys variables aux trois différents section à la parcelle (amont, milieu et aval) a été étudié en changeant les valeurs de cinq paramètres d'entrée de Calhy ; trois différentes valeurs pour chacun correspondent à des valeurs attendues sur la Crau (cf. par exemple (Bader et al., 2010; Mailhol and Merot, 2008)) (voir Tableau 2.2).

Cinq paramètres d'entrée versus trois variables de sorties. Au total, nous avons réalisé 243 simulations.

	1	2	3
K_s (m/s)	1,5E-06	1,5E-07	4,5E-06
$\Delta\theta$ (m3/m3)	0,1	0,07	0,13
H_0 (mm)	12,4	10	15
k (m ^{1/3} /s)	3,28	2,28	4,28
P_{ini} (m)	5,65	3,65	7,65

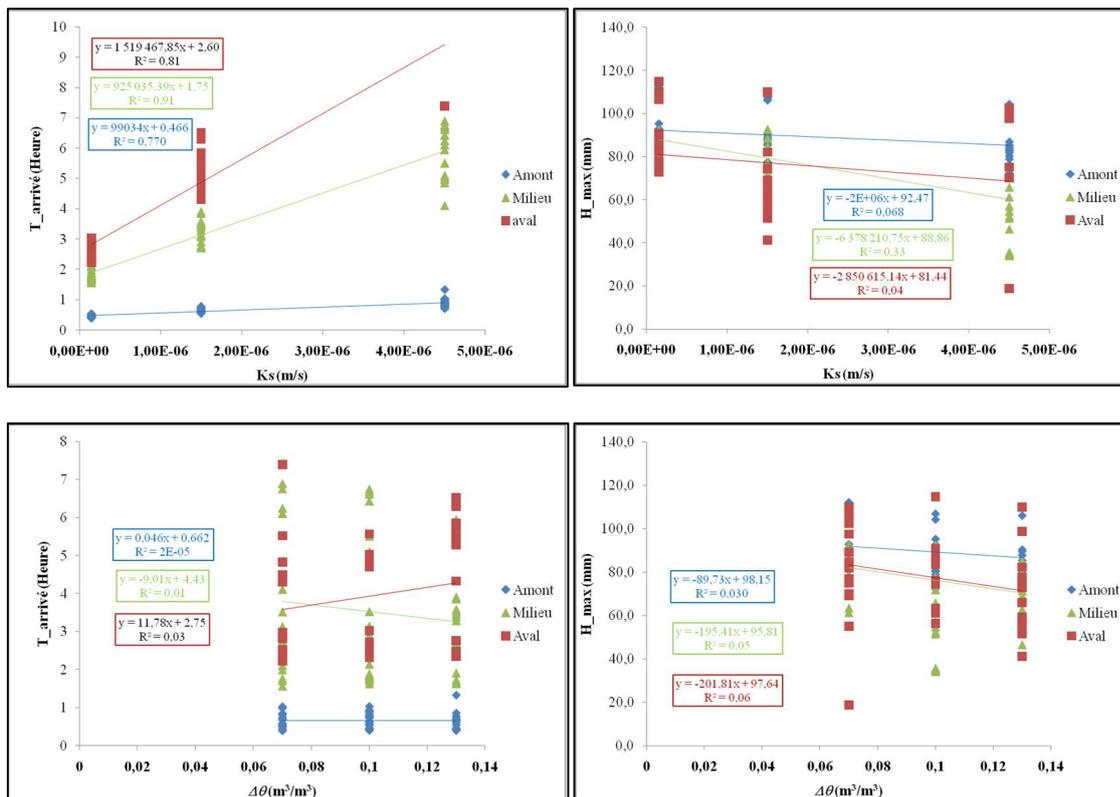
Tableau 1 : Les valeurs des cinq paramètres choisis pour étudier l'analyse de sensibilité.

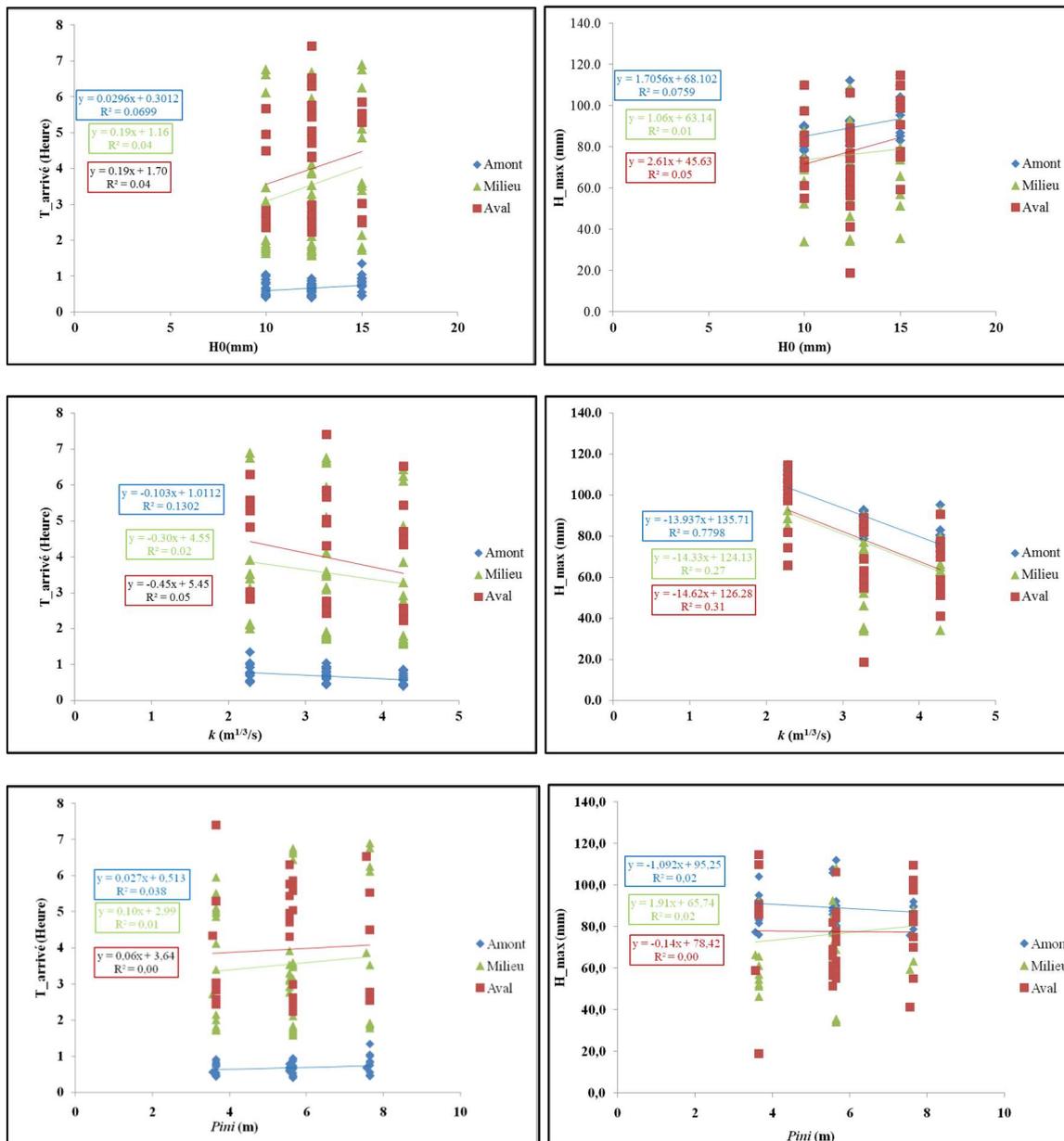
Les corrélations, simples ou multiples, entre chaque variable et les différents paramètres ont été calculés et présentés dans le tableau (1).

La sensibilité d'un proxy variable au(x) un ou plusieurs paramètre(s) est déterminé par coefficient de corrélation entre eux: un fort corrélation indique que la variable est sensible au paramètre, alors qu'au contraire une faible valeur du coefficient de corrélation indique une faible sensibilité.

- La variable H_{max} est sensible au coefficient de rugosité k . le coefficient de détermination étant de 0.79 (forte sensibilité) tandis qu'aucune sensibilité n'a été trouvée entre cette variable et les autres paramètres.
- La variable T_{arrive} est sensible à la conductivité hydraulique à saturation K_s ($R^2 = 0.77$ en amont et augment vers l'aval) et est très peu sensible aux autres paramètres.
- La variable T_{propag} présente une sensibilité encore plus forte au paramètre K_s : le coefficient de détermination a augmenté jusqu'à $R^2 = 0.92$.

R^2	H_{max}			T_{arrive}		
	52	165	224	52	165	224
K_s	0,08	0,33	0,04	0,77	0,91	0,81
$\Delta\theta$	0,03	0,05	0,06	0,0	0,03	0,01
H_0	0,069	0,04	0,04	0,07	0,01	0,05
k	0,79	0,27	0,31	0,13	0,02	0,05
P_{ini}	0,02	0,0	0,0	0,03	0,0	0,0



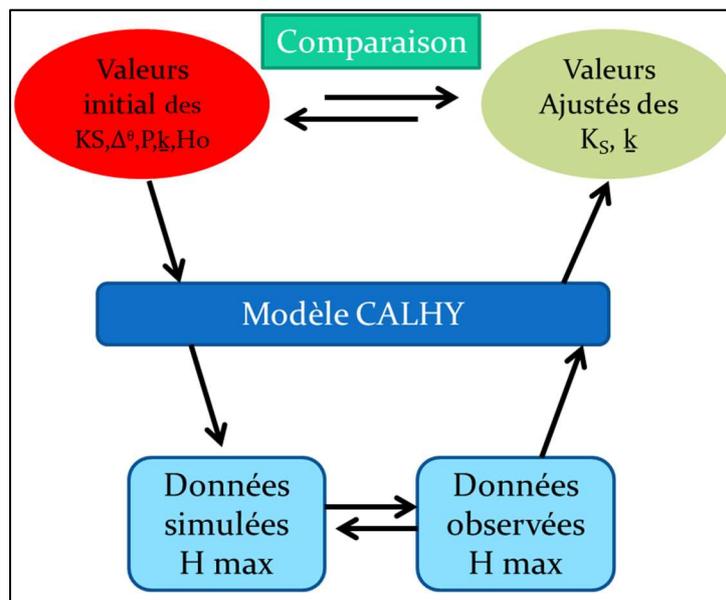


L'influents des valeurs des paramètres (K_S , $\Delta\theta$, P_{ini} , k , H_0) sur le temps d'arrivé et la hauteur maximum de la lame d'eau.

Annexe (2). L'ajustement des paramètres de modèle Calhy par l'inversion du modèle et avec des data synthétiques des proxys variables proposé.

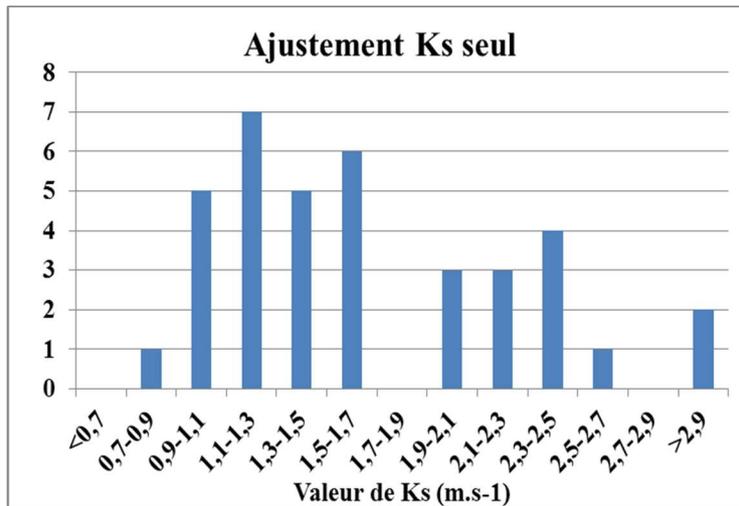
En utilisant de la fonction SOLVER dans l'environnement d'EXCEL, on a essayé de reconstituer les dynamiques d'évolution de la hauteur d'eau observés en amont et aval de la parcelle par ceux qui sont simulé en tirant les valeurs des paramètres de modèle Calhy jusqu'à arriver au minimum valeur d'erreur entre les variables simulé-observé.

Les étapes du travail sont illustrées dans le schéma suivant :

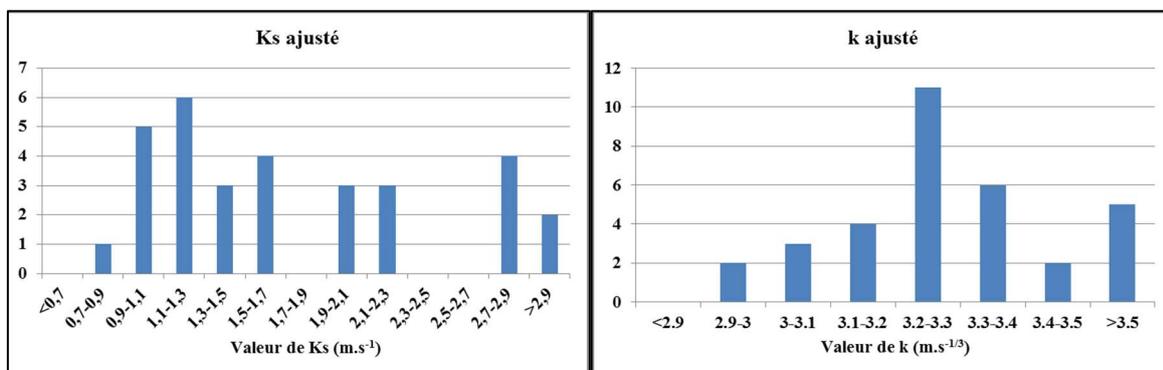


En fonction de la manière d'estimation de K_s (seul ou avec d'autre paramètre), les résultats des cinq cas différents montrent que :

- 1) On connaît tous les paramètres sauf K_s , le modèle ajuste bien la valeur de K_s .
- 2) On connaît une estimation (imprécise) des paramètres : dans 10% des cas la valeur de K_s théorique est inférieure de 67%, dans 10% est supérieure de 166% et dans 80% des cas la valeur de K_s est estimé à un facteur 1.5 près



- 3) On ne connaît aucun des paramètres, dans ce cas on peut pas estimer K_s car le valeur final de H_0 ne change pas et il y a encore un relation entre $\Delta\theta$ et P_i
- 4) Si on suppose des valeurs pour k , P_{ini} et H_0 et essayer d'ajuster K_s et $\Delta\theta$ ensemble, les résultats montrent que ça n'est pas possible due à la corrélation entre les deux paramètres d'objective.
- 5) Si on suppose des valeurs pour $\Delta\theta$, P_{ini} et H_0 et ajuster K_s et k ensemble, il est trouvé que dans 10% de cas le K_s théorique est inférieur de 62%, dans 10% est supérieur de 183% et dans 100% des cas, K_s est estimé à un facteur 2 près



Annexe (3). Etalonnage des sondes CS616

Les sondes CS616 sont des sondes capacitatives utilisées afin de capter l'évolution de la hauteur de la lame d'eau au cour d'une irrigation. La sensibilité et d'étalonnage de ces sondes ont étudié en laboratoire et été réalisée selon trois éléments :

- la sensibilité à la conductivité électrique (la salinité) et à la température de l'eau immergeant les tiges des sondes,
- la sensibilité à différentes profondeurs de fonçage des sondes dans le sol.

I) Sensibilité à la salinité et à la température de l'eau

Les sondes ont été plongées dans un cylindre rempli d'eau. En variant les profondeurs d'enfoncement entre 0 cm à 25 cm, 40 mesures du signal ont été enregistrées tous les 2 cm.

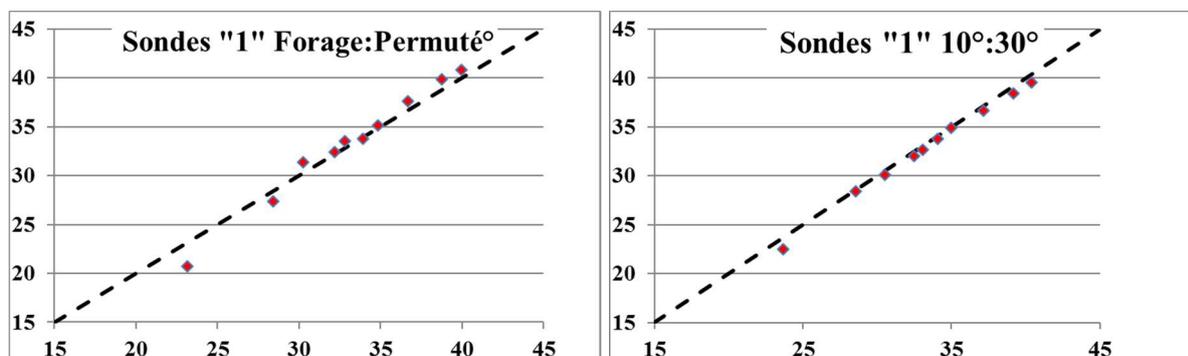
Trois types d'eau ont été utilisés :

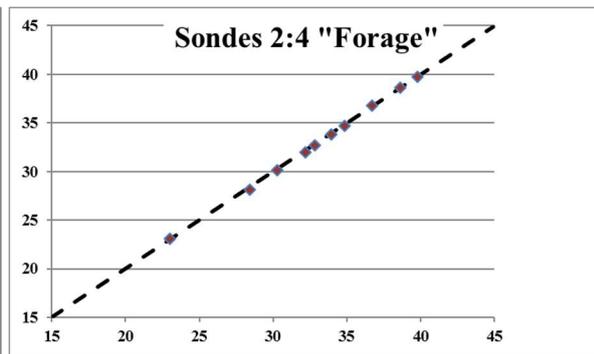
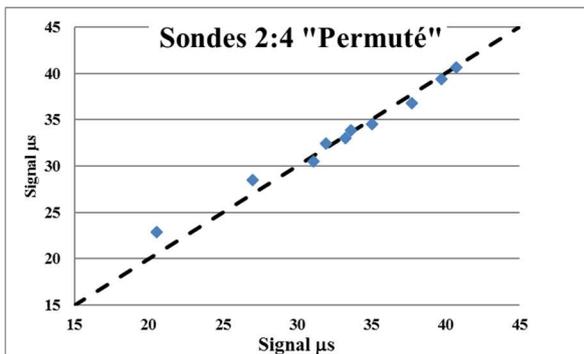
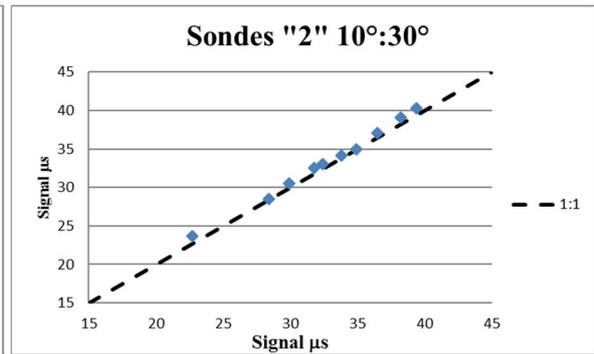
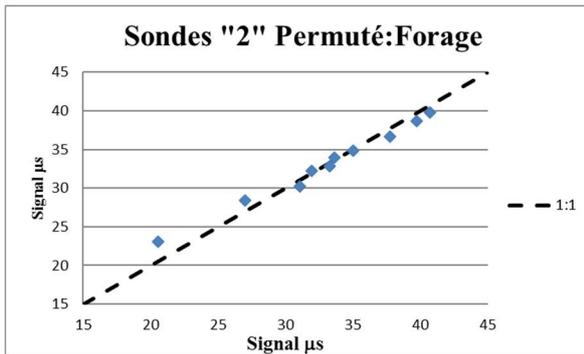
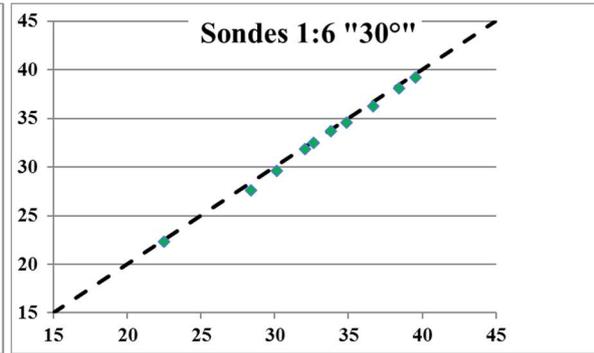
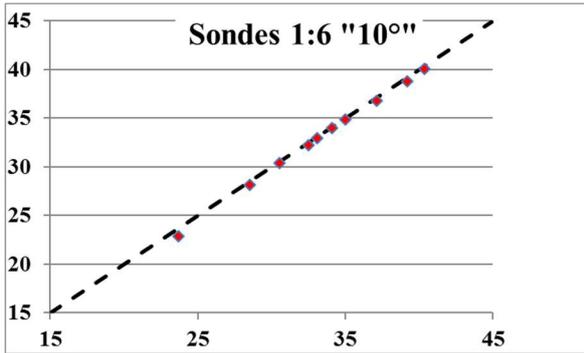
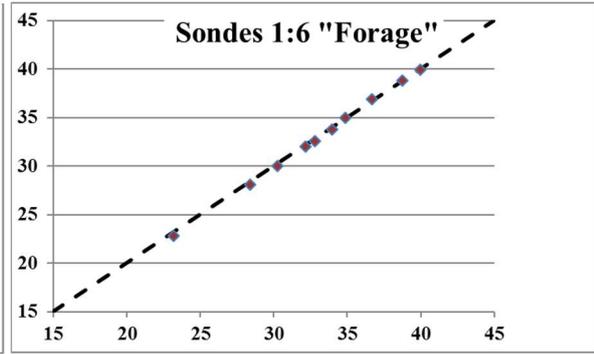
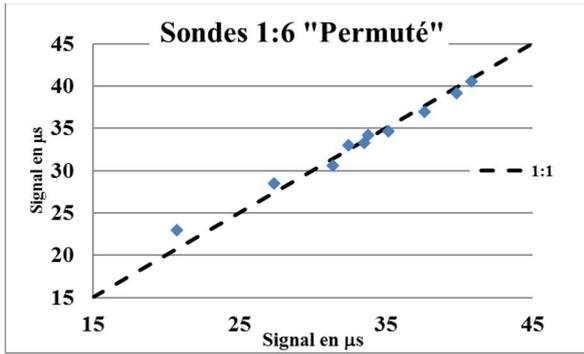
- eau permutée,
- eau de nappe provenant du forage sur le site INRA de St Paul,
- eau permutée à laquelle du CaCl_2 à la concentration de 11 g/l a été ajouté,

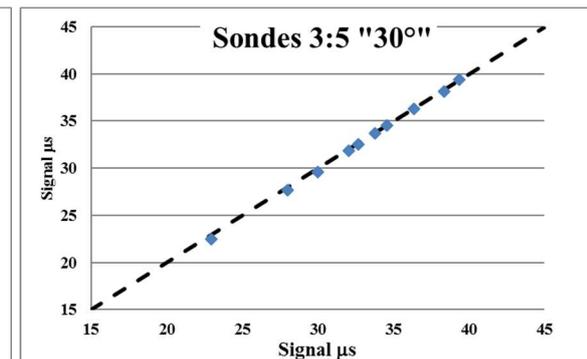
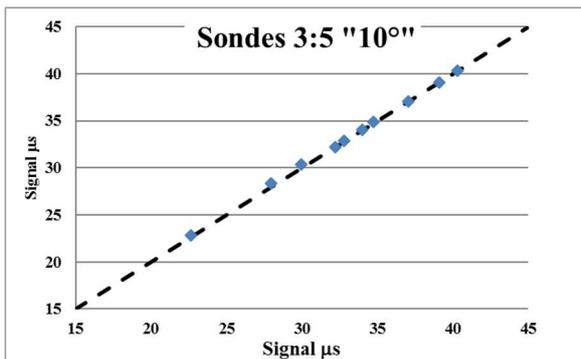
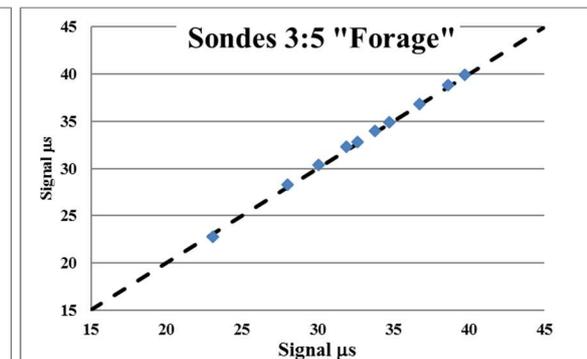
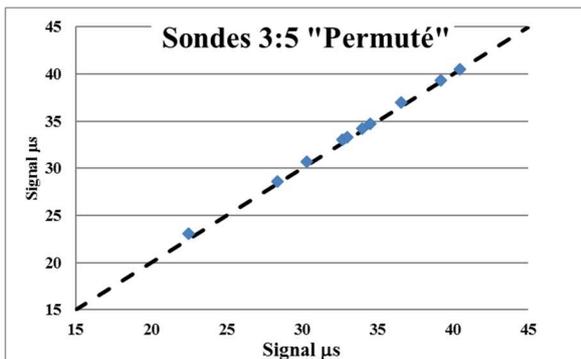
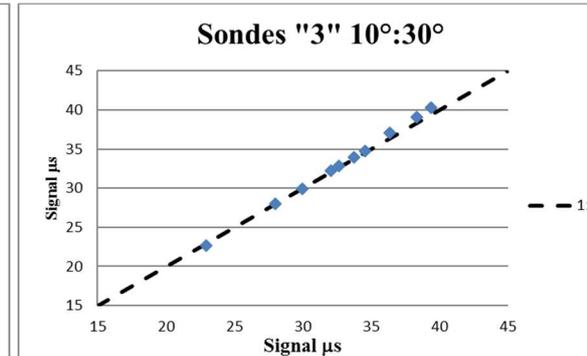
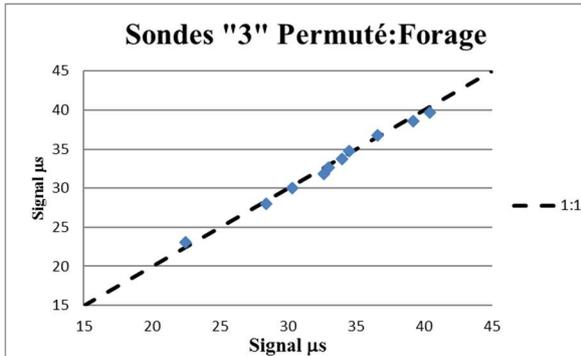
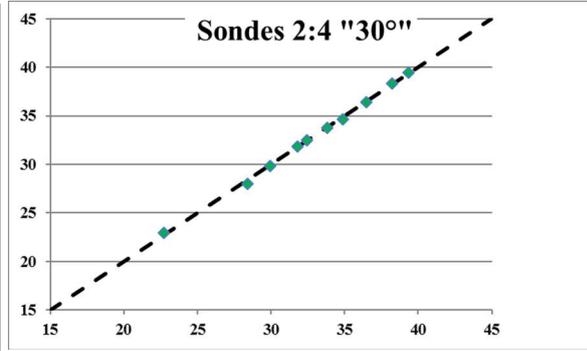
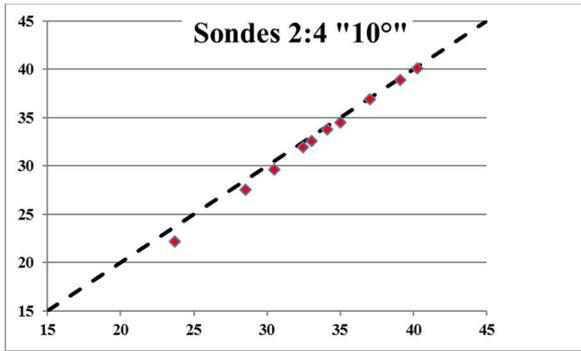
et pour l'eau permutée, l'expérience a été réalisée trois fois en faisant varier la température : 10 °C, 20 °C, 30 °C.

Il est trouvé que :

- les sondes ne sont pas sensibles à la température ni à la conductivité électrique de l'eau pour l'eau permutée ou l'eau de nappe.
- L'eau contenant du CaCl_2 perturbe le signal délivré par les sondes car il est plus conducteur. Malgré cette perturbation due aux fortes conductivités électriques, ce type d'eau s'est éloigné de ce rencontré à la zone d'étude (la Crau).





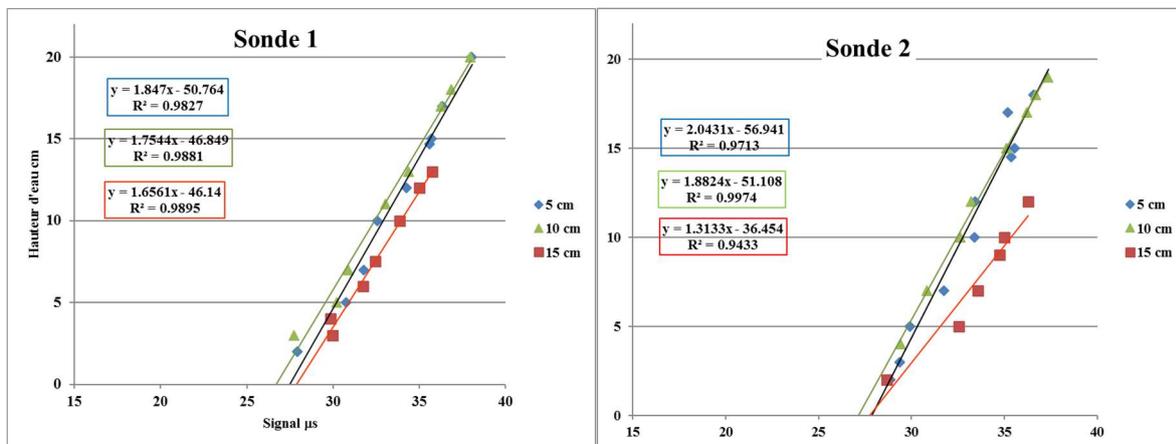


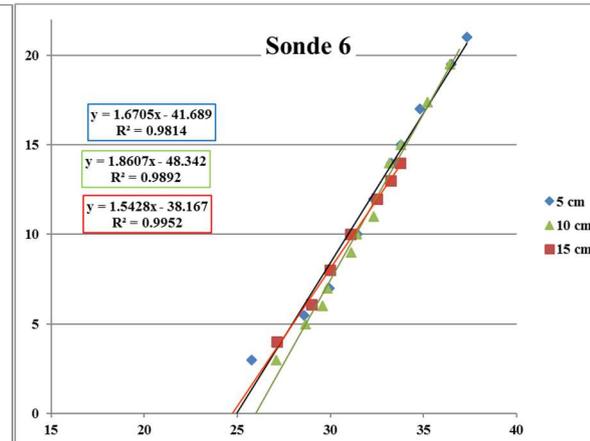
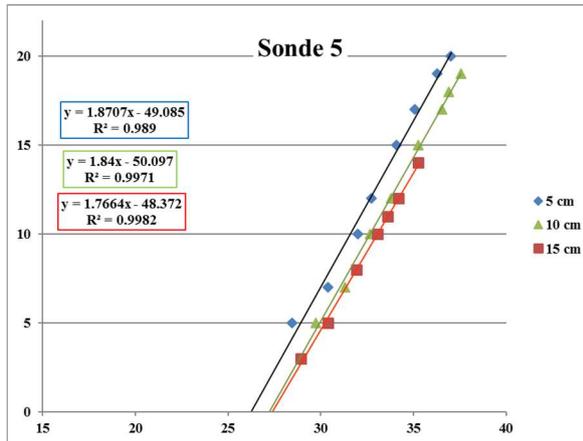
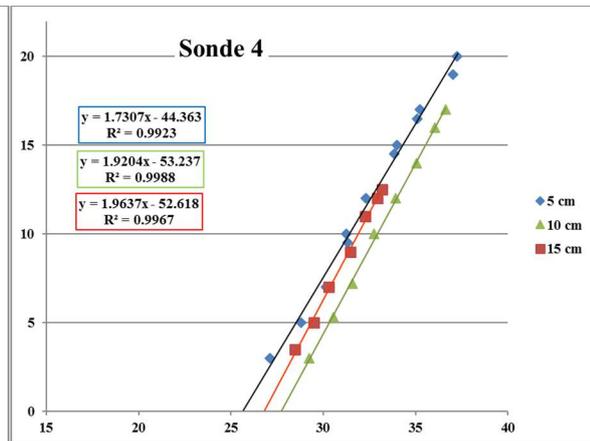
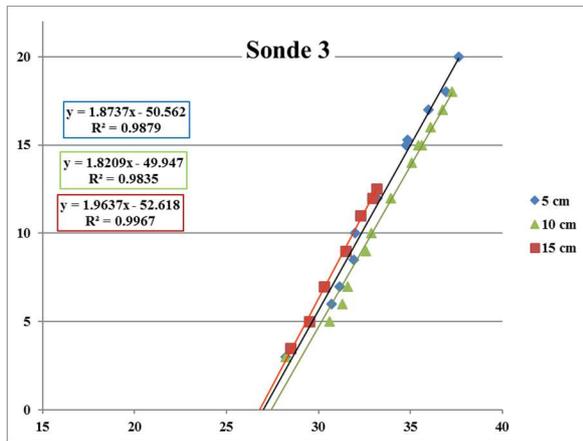
II) Sensibilité à différentes profondeurs de forage

Des mesures sont effectuées sur terrain visent à calibrer les signaux délivrés par les sondes de 1 jusqu'à 6 afin de trouver l'équivalent de chaque signal en μs celle en mm.

Les sondes CS616 ont été positionnées à l'intérieur de ce cylindre en PVC de diamètre 40 cm et de hauteur 30 cm a été enfoncé de 5 cm dans le sol afin de les étalonner dans une configuration proche de celle qui sera rencontrée sur le terrain. Ces sondes ont été enfoncées dans le sol selon trois profondeurs : 5 cm, 10 cm et 15 cm. Ensuite, des volumes d'eau ont été versés à l'intérieur du cylindre en croissance jusqu'à arriver à une hauteur d'eau d'environ 15 cm. Les signaux ont été enregistré tous les 2 seconds sert à établir les relations d'étalonnage avec les correspondants mesure de la hauteur d'eau observés.

Les résultats montrent que la hauteur d'eau versée est bien corrélée linéairement avec le signal délivré par la sonde quelle que soit la profondeur d'enfoncement dans le sol, avec des coefficients de détermination variant entre 0.983 et 0.999. La profondeur d'enfoncement de 10 cm représente un compromis entre **la stabilité** du dispositif sur terrain face la force exercée par le courant d'eau injecté dans le système d'irrigation gravitaire, par rapport à la profondeur d'enfoncement de 5 cm, et la gamme de mesure des hauteurs d'eau permettant d'être enregistrées correspondant aux celles qu'on pourra retrouver sur le terrain : elles sont généralement de l'ordre de 7 à 11 cm.





Annexe (4) Les enquêtes ont été réalisées à l'aide d'un entretien direct avec les exploitants à la Crau :

Questionnaire producteurs foin de Crau

1. Quel est le nom de votre exploitation ? _____

2. Quel est le type de votre exploitation agricole ?
 - GAEC
 - EARL
 - SCEA
 - GFA
 - Autre :

3. Depuis quelle année gérez-vous votre exploitation ? _____

4. A quelle date (approximativement) l'exploitation que vous conduisez a-t-elle été créée (origine) ? _____

5. Quel est votre âge ?
 - moins de 30 ans
 - entre 30 et 45 ans
 - entre 46 ans et 60
 - + de 60 ans

6. Pensez-vous qu'il vous serait possible de céder ou transmettre votre exploitation ?
 - oui, facilement
 - oui, difficilement
 - non
 - ne se prononce pas

Si oui, pouvez-vous préciser le type de cession que vous pourriez envisager (transmission, vente, fermage, location/gérance) ? _____

7. Avez-vous déjà pensé à réorienter votre activité agricole partiellement ou en totalité, ou même à arrêter celle-ci ? **oui – non**

Si oui, pouvez-vous préciser la manière ?

- réorientation partielle
- réorientation totale

- abandon de l'activité agricole
- autre(s) :

8. Quelle est la surface agricole de votre exploitation (ha) ?

- moins de 30
- de 30 à 60
- de 61 à 90
- de 91 à 120
- de 121 à 150
- + de 150

9. Quelle est la surface allouée à la prairie ? _____ ha

Pour un nombre équivalent de parcelles : _____

10. Quel est l'âge de la dernière prairie mise en place ? _____ ans

11. Pratiquez-vous un autre type de culture que la prairie ? **oui - non**

Si oui, pouvez-vous renseigner le tableau qui suit sur les caractéristiques de votre culture secondaire ou de complément :

Caractéristiques de la culture(s)	Oui	Non	Surface en ha, (ou %/Stot)	Précisions si besoin
Pérenne ?				<u>Laquelle :</u>
Annuelle ?				<u>Laquelle :</u>
Plusieurs cycles végétatifs sur l'année ?				<u>Nombre de cycles :</u>
Rotation ?				<u>Type :</u>
Irrigation ?				<u>Type :</u> <u>Durée :</u> <u>Fréquence :</u> <u>Quantité :</u>
Production BIO ?				
Rendement ?				

Si oui, pouvez-vous localiser sur la vue aérienne ci-jointe vos différentes cultures et leur évolution dans l'espace (le cas échéant) sur les 20 dernières années ?

Dans le cas de changements de cultures dans le temps et/ou l'espace, pouvez-vous expliquer la ou les raisons de ces évolutions ?

12. D'une manière générale, pouvez-vous décrire les évolutions des différents types d'activités agricoles et/ou types de cultures qui ont pu survenir depuis la création (l'origine) de l'exploitation que vous conduisez ?

13. Avez-vous une activité d'élevage ? **oui - non**

Si oui, lequel ? _____

Quelle est l'importance de cette activité en nombre de têtes ? _____ têtes

14. Accueillez-vous sur vos prés un berger et son troupeau d'ovins ? **oui – non**

Si oui, quel(s) avantage(s) trouvez-vous à la pratique pastorale ?

15. Pouvez-vous indiquer le nombre moyen de passages du troupeau sur une prairie ?

16. En termes de fertilisation pouvez-vous préciser quelle est l'origine de vos amendements ?

Caractéristiques de la fertilisation	Oui	Non	Surface en ha, (%/Stot)	Précisions si besoin
Litière/fumier ?				<u>Quantité et période :</u>
Déjections des bêtes ?				<u>Nombre de bêtes :</u> <u>Nombre de passages :</u> <u>Période :</u> <u>Différentiel du nombre ou poids des bêtes en entrée et sortie :</u>
Engrais chimiques ?				<u>Nombre d'apports :</u> <u>Quantité(s), composition(s) et période(s) :</u> <u>Nom :</u>
Remarque(s) :				

17. Quelle est l'origine de l'eau servant à l'irrigation et quelles sont les proportions des différentes eaux utilisées (le cas échéant) par rapport au volume total ?

- eau du canal (Durance) : _____ %
- eau de la nappe phréatique : _____ %
- eau des fossés d'assainissements et/ou roubines : _____ %
- eau des différents étangs et/ou sources : _____ %
- eau de récupération stockée (pluies, fuites filioles et/ou martelières, ou pertes en colature) : _____ %

Existe-t-il une évolution de ces proportions sur la saison d'irrigation ? **oui - non**

Si oui, pouvez-vous préciser la tendance ? _____

Existe-t-il une évolution de ces proportions sur les 20 dernières années ? **oui - non**

Si oui, pouvez-vous préciser la tendance ? _____

18. Pouvez-vous indiquer sur la photo aérienne ci-jointe la chronologie ou le sens d'irrigation le plus fréquent à l'échelle de votre domaine (par quartier) ?

Est-ce toujours la même chronologie ? _____

19. Quel est votre droit d'eau ou le débit d'eau dont vous disposez (litres/seconde) et le nom du canal dont vous dépendez ?

_____ l/s _____

_____ l/s _____

20. Quelle est la période de retour de votre droit d'eau ?

_____ jours

21. Durant combien de temps l'eau d'irrigation est-elle disponible sur l'exploitation ?

- eau du canal (jours pleins par tour d'eau) : _____
- eau de pompage ou forage (autre que canal) : _____

22. Sur quelle période de l'année irriguez-vous vos prairies ?

23. Votre droit d'eau effectif (débit délivré par le canal) évolue-t-il sur la période d'irrigation ? **oui - non**

Si oui, pouvez-vous préciser à quel(s) moment(s) se fait cette évolution et dans quelle(s) proportion(s) (%) ? _____

Si oui, pouvez-vous préciser les raisons de ce ou ces changements ? _____

24. A 100% de votre droit d'eau, le débit disponible peut-il varier durant l'irrigation d'une parcelle ? **oui – non**

Si oui, pouvez-vous préciser les proportions (%) de cette variation ? _____

Si oui, pouvez-vous préciser les raisons ? _____

25. Quels sont les facteurs par ordre décroissant d'importance qui vous conduisent à déclencher une irrigation ? (de 1=le plus important à 4=le moins important)

- le tour d'eau :
- l'humidité du sol :
- la date de coupe :
- les prévisions météorologiques (vent, pluie, etc.) :
- autre(s) facteur(s) :

26. A partir de quelle hauteur de précipitations « sautez-vous » votre tour d'eau ?

_____ mm

27. Sautez-vous votre tour d'eau avant une coupe ? (trouvez-vous nécessaire de ne pas irriguer avant une coupe) **oui – non**

Quelle que soit votre réponse, pouvez-vous expliquer les raisons de votre pratique ?

28. Avez-vous noté une différence dans l'irrigation qui serait liée à la hauteur de la prairie ? **oui – non**

Si oui, pouvez-vous préciser les faits observés ? _____

29. Avez-vous noté une différence dans l'irrigation qui serait liée au cortège floristique de la prairie (entre 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} coupe) ? **oui – non**

Si oui, pouvez-vous préciser les faits observés ? _____

30. Votre droit d'eau a-t-il augmenté ou diminué depuis la création ou le début de votre activité ? **oui – non**

Si oui, dans quelle proportion ? _____ l/s
 Si oui, pouvez-vous préciser les raisons de cette évolution ? _____

31. La surface en prairie de votre exploitation a-t-elle augmentée ou diminuée depuis la création ou le début de votre activité ? **oui – non**

Si oui, dans quelle proportion ? _____ % ou ha
 Si oui, pouvez-vous préciser les raisons de cette évolution ? _____

§§§§§§§§§§

32. Dans vos pratiques courantes d'irrigation ou dans la recherche d'adaptation de ces pratiques à de nouvelles contraintes (diminution de la ressource de l'eau, augmentation de la surface à irriguer, augmentation des différents coûts, etc.), quelles stratégies parmi les suivantes privilégiez-vous ?

Stratégie S1 : entretien et aménagements des canaux secondaires (filioles et rigoles)	Oui	Non	Précisions si besoin Pourquoi ? Comment ?
Entretien des filioles ?			
Entretien des rigoles ?			
Entretien des martelières ou batardeaux (palettes) ?			
Automatisation des martelières ou batardeaux (palettes) ?			
Choix du nombre et des dimensions des entrées d'eau ?			
Choix de l'altitude des entrées d'eau ?			
Autre(s) ? :			

Stratégie S2 : profilage des parcelles	Oui	Non	Précisions si besoin Pourquoi ? Comment ?
Recherche d'une superficie particulière du calant ?			
Recherche d'une taille ou dimensions (Lxl) particulières du calant ?			
Recherche d'une superficie particulière de la parcelle ?			
Recherche d'une taille ou dimensions (Lxl) particulières de la parcelle ?			
Choix du nivellement ?			
Recherche d'une pente particulière ?			
Mise en place de merlons (bourrelets) longitudinaux qui modèlent la parcelle en plusieurs calants ou planches ?			
Modelage de la parcelle en calants étagés ?			
Mise en place d'un merlon (bourrelet) en bout de parcelle ?			
Autre(s) ? :			
Remarques :			

Stratégie S3 : caractéristiques de l'irrigation du calant	Oui	Non	Précisions si besoin : Pourquoi ? Comment ?
Avec le débit maximum ?			
Avec un débit moindre ?			
De longue durée ?			
De courte durée ?			
Adaptation du calant au débit ?			
Adaptation du débit au calant ?			
Avec une lame d'eau frontale déversée en amont du calant (1) ?			
Avec une lame d'eau déversée latéralement par une rigole perpendiculaire à la rigole principale (2) ?			
Irrigation alliant (1) et (2) ?			
Autre(s) ? :			

33. De quelle façon irriguez-vous lorsque vous êtes confronté à un manque d'eau (début ou fin de saison, restriction d'eau, etc.) ?

34. Quels seraient pour vous les caractéristiques de la parcelle idéale au regard de vos moyens matériel et humain et de vos objectifs de production ?

Caractéristiques de la parcelle ou calant idéal (Unité de travail ? : irri, coupe, pature)	
Superficie (ha)	
Dimensions lxL (m)	
Nivellement	
Pente (°/∞, pour 1000)	
Nombre de calant	
Débit d'irrigation (l/s)	
Durée d'irrigation d'un calant ou de la parcelle si 1 calant (h)	
Tour d'eau (jour)	
Période(s) d'irrigation disposant de 100% du droit d'eau	
Déclenchement automatique ou manuel de l'irrigation (oui/non)	
Rendement (T/ha/3 coupes)	
Autres	

Nom de l'enquêté :

Nom de l'enquêteur :

Nom du rédacteur :

Durée de l'entretien :

Date :

Synthèse des données d'aménagement

ETAT DE LA DISPONIBILITE EN EAU ET DE LA SURFACE EN PRAIRIE IRRIGUEE entre 1950 et 2014	Autour de 1950	En 19	En 2014
Surface prairie irriguée (S ²)	ha	ha	ha
Droit d'eau (débit instantané)	l/s	l/s	l/s
Durée du tour d'eau (période de retour)	? jours (h)	jours (h)	jours (h)
Durée présence de l'eau sur le domaine	? jours (h)	jours (h)	jours (h)
Disponibilité en l'eau : débit instantané x (durée présence eau/durée tour d'eau)	? l/s	l/s	l/s
Rapport : disponibilité en l'eau / S ²	? l/ha	1. l/ha	1. l/ha

ETAT DE LA DISPONIBILITE EN EAU ET DE LA SURFACE EN PRAIRIE IRRIGUEE entre 1950 et 2014	Autour de 1950	En 1982	En 2014
Surface prairie irriguée (S ²) : quartier ou point A, Mas de Petit St Jean (terre noire)	ha	ha	19 ha
Droit d'eau (débit instantané)	? l/s	? l/s	97 l/s
Durée du tour d'eau (période de retour)	? jours (h)	7 jours (168 h)	7 jours (168 h)
Durée présence de l'eau sur le domaine	? jours (h)	7 jours (168 h)	1.1 jours (26 h)
Disponibilité (1) en l'eau : débit instantané x (durée présence eau/durée tour d'eau)	? l/s	? l/s	15 l/s
Rapport : disponibilité en l'eau / S²	? l/ha	? l/ha	0.8 l/ha
Surface prairie irriguée (S ²) : quartier ou point B, Mas Capeau (terre rouge)	ha	ha	18 ha
Droit d'eau (débit instantané)	? l/s	? l/s	83 l/s
Durée du tour d'eau (période de retour)	? jours (h)	7 jours (168 h)	7 jours (168 h)
Durée présence de l'eau sur le domaine	? jours (h)	7 jours (168 h)	2.3 jours (55 h)
Disponibilité (2) en l'eau : débit instantané x (durée présence eau/durée tour d'eau)	? l/s	? l/s	27 l/s
Rapport : disponibilité en l'eau / S²	? l/ha	? l/ha	1.5 l/ha
Disponibilité totale : quartiers ABCD + E	? l/s	? l/s	42 l/s
Rapport : disponibilité en l'eau / S ²	? l/ha	? l/ha	1.1 l/ha

SYNTHESE DE L'EVOLUTION DES SURFACES DES DIFFERENTS MILIEUX ENTRE 1950 ET 2014				
	Domaine	1950	1990	2014
S ² Prairie				
S ² autres cultures				
S ² milieux naturels				
S ² Total				

SYNTHESE DE L'EVOLUTION DES SURFACES DES DIFFERENTS MILIEUX ENTRE 1950 ET 2014				
	Domaines	1950	1990	2014
S ² Prairie				
S ² autres cultures				
S ² milieux naturels				
S ² Total / site				
S ² Total général				

SUPPRESSION DE HAIES (entre 1947 et 2014), en lien directe avec la recherche de surface de prairie sans discontinuité plus grande									
Sites	1	2							
Caractéristique du site	Prairie	arbo → rotation/prairie							
Dates	71-93								
Linéaire haie (m)									
Nbre parcelles ou prairies initiales									
Nbre parcelle(s) ou prairies finale(s)									
Surface totale (ha)									
Surface/nbre parc. finale(s) (ha)									

CREATION DE HAIES (entre 1947 et 2014), en lien directe avec la mise en place de prairies									
Sites	1	2							
Caractéristique du site	Coussoul.	Coussoul/ terrain agricole							
Dates									
Linéaire haie (m)									
Surface initiale (ha)									
Nbre parcelles ou prairies finales									
Surface/nbre parcelles finale(s) (ha)									

Complément à l'enquête :

Notez-vous certaines de vos pratiques agricoles et seriez-vous vous d'accord pour nous en communiquer tout ou partie ? **oui - non**

Si oui, quel est le type de pratiques que vous notez, depuis combien de temps, et sous quelles formes se présentent ces données ?

Type de pratiques agricoles notées	format papier (1)/ format informatique (2)	sur quelle période	à la parcelle (1) / à l'ilot (2) / à l'exploitation (3)
Dates des irrigations			
Dates des coupes			
Dates (et doses ?) des amendements			
Rendements			
Autres			

Résumé

Résumé Français :

Sur la région de la Crau, le système d'irrigation gravitaire appliqué aux prairies de foin joue un rôle important dans le maintien du cycle hydrologique en étant le principal contributeur à la recharge de la nappe souterraine de la Crau (70 à 80% de la recharge). Dans le futur, des pressions sur la ressource en eau alimentée ce système d'irrigation risquent de s'accroître du fait des changements climatiques et de l'augmentation des autres usages de l'eau (domestiques, industriels, ..) et induisent la nécessité de l'optimisation de ce système afin de maintenir l'état des ressources en eau souterraines. Cette optimisation nécessite la connaissance des faibles quantités d'eau apportées à la parcelle qui sont mal connues, et de spatialiser ces quantités à l'échelle du territoire. Ainsi, l'objectif de ce travail est de développer une méthodologie permettant d'améliorer la quantification de ces volumes à deux échelles (parcellaire et régionale). Un système numérique incluant un modèle d'irrigation gravitaire dénommé 'Calhy' a été développé au cours de ce travail. Ce système permet de caractériser le fonctionnement des principaux processus intervenant dans ce système d'irrigation (infiltration de l'eau dans le sol et la propagation à la surface de la parcelle). Mais l'estimation de ces processus est limitée par la connaissance de certains paramètres non mesurables, tels que la conductivité hydraulique à saturation du sol et la rugosité hydraulique de la surface parcellaire. Une analyse de sensibilité AS a été menée dans un premier temps au cours de ce travail afin de définir la contribution de la variation de chaque paramètre non mesurable sur la variance des variables de sortie. Les résultats montrent la possibilité d'estimer ces paramètres à partir des accessibles variables auxquels ils sont sensibles. Ainsi, une méthode d'inversion s'est basée sur les résultats d'AS, combine le modèle Calhy et un dispositif expérimental a été appliqué dans un second temps pour l'estimation des paramètres et valider l'approche proposée. Les résultats montrent que cette approche est robuste et efficace pour estimer ces paramètres. A la fois les paramètres ont été estimés ou mesurés, nous avons étudié différentes modifications du système d'irrigation actuel (changement de la pente de la parcelle, du sens d'irrigation, l'apport de l'eau en différents points de la parcelle, ...), et leurs impacts sur l'homogénéité de l'infiltration et la durée de l'irrigation.

En parallèle, Nous avons établi un modèle empirique de dose d'irrigation basé sur l'analyse des pratiques d'irrigation investigués auprès des enquêtes procédés chez les agriculteurs. Différents modèles empiriques ont été développés en basant sur des régressions calculant la dose d'irrigation et la durée en fonction du débit disponible et des paramètres parcellaires caractérisant les conditions d'irrigation tels que la géométrie de la parcelle (longueur, largeur et surface). Le modèle de dose empirique investigué au cours de ce travail permet de fournir une estimation de la dose distribué sur tout le territoire de la Crau en intégrant ce modèle dans le simulateur de la Crau.

Abstract :

Worldwide, the irrigation accounts for 70% of all water consumption: understanding the relationship between irrigation and ecosystems and optimizing the irrigation practices can contribute to the sustainability management of water resources. In the Crau region (southern of France), the flooding irrigation system used for irrigating the hay fields plays an important role in water cycle: in this system, considerable amounts of water are brought to the hay fields (about 20 000 m³/ha/year i.e. 2 000 mm), which participate strongly to the recharge of the Crau aquifer (between 66% and 80% of the recharge). In the future, the pressures on the availability of water resources that feed this irrigation system (the reservoir of Serre Ponçon) may increase because of the climate change and the increase in the another water uses. Thus, it becomes necessary to optimize the irrigation practices in order to conserve the water and ensure a sufficient recharge for aquifer of the Crau. This optimization requires i) the knowledge of the amount of water brought to the plot that are not currently known, ii) spatialize these amounts over the regional scale. This work aims to develop a methodology to improve the quantification of these volumes at the field and regional scales. A numerical system that includes a flooding irrigation model called 'Calhy' was developed, takes into account the main processes involved in this irrigation system (water infiltration into the soil and the runoff of water slide over the plot surface). Firstly, a sensitivity analysis was conducted in order to classify the Calhy's parameters according to their importance and define an optimal experimental apparatus allowing to estimate them using an inverse approach. Secondly, an inversion procedure based on the proposed experimental

apparatus and the previous model was implemented on several plots in the study area. The results show that the important parameters can be estimated and then Calhy can be used to analyse and optimize irrigation practices. Then, different optimization scenarios were identified. In parallel, we developed an empirical model of irrigation dose based on the analysis of irrigation practices in a group of exploitations in the study region. Different empirical models were developed; regressions were used to compute the irrigation dose and duration from geometrical characteristics of the borders (length, width and surface) and available water inflow rate. The empirical model of irrigation dose developed in this work would provide a spatial estimation of irrigation doses overall plots in the study region, and would contribute to a better quantification of water recharge of the Crau aquifer and its locations.

