

A) Occupation des sols non artificialisés

1) Objectifs

Parmi les paramètres d'entrée des modèles de cultures et des modèles de prospective territoriale, l'occupation de surface est une donnée de base sur laquelle reposent les différentes simulations. Pour réaliser une cartographie à échelle fine du territoire de la Crau (Figure 1), la télédétection représente une source d'informations exhaustive et fiable. Les outils et les méthodes de traitement d'images satellites à haute résolution spatiale (Référence Fonctionnelle E4) permettent de différencier le type de surface et, par conséquent, de fournir des cartes d'occupation de surfaces non artificialisées multi-dates (RF I2).



Figure 1. Zone d'études de la Crau pour la classification des surfaces non artificialisées

Dans le cadre du projet, les cartes d'occupation de surface sont destinées au modèle STICS pour déterminer le type de cultures des parcelles et au modèle METRONAMICA pour élaborer des scénarios de développement territorial. Pour répondre aux besoins spécifiques de la modélisation, 20 classes d'occupation de surface ont été créées :

1. Prairies irriguées
2. Prairies sèches, coussoul
3. Cultures d'hiver

4. Cultures d'été
5. Vergers industriels irrigués
6. Vergers industriels en jachère (peut être fusionnée à la classe 5 ou 21)
7. *Sans objet¹ (ID conservé en cas de création d'une nouvelle classe)*
8. Oliviers
9. Vignes
10. Autres vergers irrigués
11. Serres
12. Plages et dunes de sable
13. Marais maritimes et theys
14. Salins
15. Marais
16. Eau permanente
17. Garrigues dégradées, végétation clairsemée
18. Garrigues, forêt, végétation semi-dense à dense
19. Sol nu, sols artificialisés
20. Riz
21. Autres cultures, jachère (sol nu agricole), friches agricoles

L'identification des surfaces non artificialisées correspond au processus T2 (Error: Reference source not found) de collecte et de traitement des données acquises défini dans l'architecture technique du projet (niveaux 0, 1, 2). Ces travaux de différenciation spatiale des surfaces non artificialisées complètent les efforts du CEREGE portant sur les surfaces artificialisées.

2) Méthodes Classification

Pour obtenir les classifications des surfaces non artificialisées multi-dates, l'acquisition d'images satellites multi-spectrales à haute résolution spatiale a été nécessaire. Le choix s'est porté sur les produits de SPOT Image (<http://www.spotimage.com>) qui répondent aux besoins du projet : caractéristiques techniques (répétitivité d'acquisition, trace au sol, résolution spatiale...), souplesse de programmation, archives disponibles, options de prétraitement, réactivité des services techniques...

Pour analyser l'évolution temporelle de l'occupation de surface et étudier la dynamique saisonnière (suivi du cycle végétatif par exemple) permettant d'identifier le type de surface, une série d'images a été acquise en mono-licence sur programmation et sur archives :

⇒ 11 images multispectrales (4 bandes, du visible au proche-infrarouge) à haute résolution spatiale (10 à 20 m) de fin mars à octobre 2009 : une acquisition tous les 15 à 20 jours en moyenne ;

⇒ 1 image multispectrale (3 bandes, visible) à très haute résolution spatiale (2,5 m) acquise fin juin 2009 ;

⇒ 3 images multispectrales (3 bandes, visible) à haute résolution spatiale (20 m) acquises en mars, juillet et septembre 1997.

La commande a été effectuée dans le cadre du programme ISIS (<http://www.isis-cnes.fr>) qui favorise l'acquisition d'images SPOT auprès de la communauté scientifique européenne à un coût préférentiel. Toutes les images SPOT ont été livrées au format GeoTIFF dans la

¹ ex-classe « anciennes parcelles de vergers industriels (friches) » fusionnée à la classe 21

projection officielle pour la France métropolitaine, soit la projection Lambert-93, référentiel géodésique français 1993 (unités en mètres). Le niveau de prétraitement est le niveau 3 (SPOTView Ortho Basic) avec une mise en projection cartographique à partir de points d'appui et d'un modèle numérique d'élévation (MNE) issu de Reference3D (produit SPOT Image). Il s'agit du prétraitement le plus abouti et le plus précis proposé par le fournisseur. Le calage a été vérifié par l'UMR EMMAH sur l'ensemble du territoire de la Crau.

Pour compléter le dispositif axé sur la télédétection et parallèlement aux mesures *in situ* (Cf. Mesures complémentaires) réalisées pendant la campagne expérimentale 2009 (avril à octobre), plus de 80 relevés terrain (Figure 2), caractérisant les principaux types de sol, ont contribué à la réalisation de classifications supervisées et à la validation de données provenant des traitements d'images satellites.

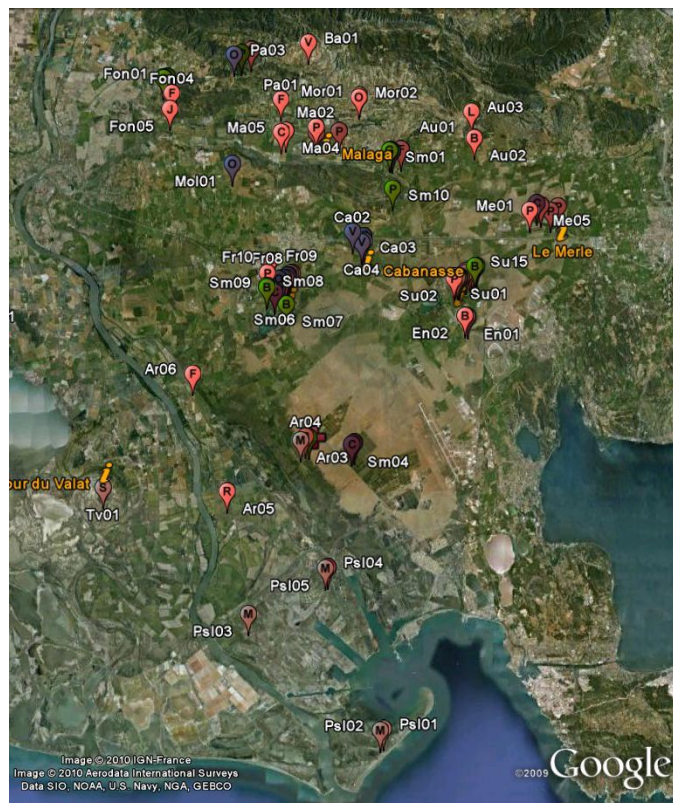


Figure 2. Relevés terrain facilitant la réalisation de classifications supervisées et la validation des cartes d'occupation de surfaces non artificialisées

La BD Ortho® de l'Institut National Géographique (IGN) disponible sur le Géoportail (<http://www.geoportail.fr>) et Google Earth donnent également accès à des images aériennes et/ou satellites à très haute résolution spatiale (attention aux dates de prise de vue). Ces couches d'informations complémentaires sont utiles pour la caractérisation et la validation du type de surface.

Le logiciel propriétaire ENVI (<http://www.itvis.com/ProductServices/ENVI.aspx>) est utilisé pour le traitement des images (classifications, sélections, mise au format, masques...). Ce logiciel, reconnu par les professionnels à vocation technique et scientifique, est spécialisé dans le traitement des images géospatiales. Le module « Classification » permet de tester de

nombreux modèles mathématiques et statistiques (maximum de vraisemblance, IsoData...) adaptés à l'extraction des surfaces non artificialisées.

3) Mise en œuvre des Classification

Pour produire les cartes d'occupation de surfaces non artificialisées, des classifications supervisées et non supervisées ont donc été appliquées avec le logiciel ENVI. Dans un premier temps, des classifications supervisées (parallelepiped par exemple) s'appuyant sur les observations de terrain et des classifications non supervisées (K-means par exemple) ont été testées à l'échelle du territoire sur l'ensemble des classes et des bandes spectrales des images prises en 2009 (ou sur les bandes spectrales les plus pertinentes pour les objets recherchés). Comme les résultats n'ont pas été concluants (confusion vergers secs et prairies sèches par exemple, traitements post-classification(s) fastidieux...), le choix de travailler par type d'occupation du sol s'est avéré intéressant : le principe était d'identifier les classes une à une en se concentrant sur un type de sol.

Comme les images SPOT disponibles en 1997 et 2009 étaient majoritairement à 20 m de résolution spatiale, les travaux ont été accomplis à cette résolution. En 2009, la résolution géométrique des images à plus fine résolution spatiale (10 m) a donc été dégradée. L'utilisation de l'image SPOT à très haute résolution spatiale (2,5 m) a été déterminante pour localiser les marais, les plages, mais surtout les vergers et les serres. Elle a également facilité la validation des différentes classes.

Les approches diffèrent selon le type d'occupation de surface (Tableau 1, Tableau 2). D'une manière générale, les classifications doivent regrouper le plus grand nombre de pixels appartenant à une classe afin de limiter les traitements post-classification(s). En 2009, pour les prairies irriguées par exemple, une classification supervisée (parallelepiped) et une détection de changement entre dates (mars et octobre par exemple) ont donné les résultats les plus pertinents. Le traitement post-classification a consisté à homogénéiser les résultats (clump classes), puis à les modifier (ajout ou suppression de pixels) par photo-interprétation.

Classe	Type de classification	Post-classification	Modifications/création ROIs* ⇒ validation	Résolution spatiale
Prairies irriguées	supervisée, parallelepiped + détection de changement	clump classes	photo-interprétation	20 m
Prairies sèches, coussoul	supervisée, parallelepiped	-	photo-interprétation	20 m
Cultures d'hiver	détection de changement	-	photo-interprétation	20 m
Cultures d'été	spectral angle mapper	segmentation	photo-interprétation	20 m
Riz	spectral angle mapper	-	photo-interprétation	20 m
Vergers industriels irrigués	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Vergers industriels en jachère	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Autres vergers irrigués	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Vignes	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Oliviers	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Serres	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Autres cultures, jachère, friches agricoles	-	-	photo-interprétation à partir de "sol nu, sols artificialisés"	20 m
Plages, dunes de sable	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Marais maritimes et theys	-	-	photo-interprétation	2,5 m
Salins	-	-	photo-interprétation	20 m
Marais	-	-	photo-interprétation	20 m
Eau permanente	non supervisée, K-means + détection de changement	-	photo-interprétation	20 m
Garrigues dégradées, végétation clairsemée	= pixels non classés dans les autres classes	-	photo-interprétation	20 m
Garrigues, forêt, vég. semi-dense à dense	non supervisée, K-means	segmentation	photo-interprétation	20 m
Sol nu, sols artificialisés	supervisée, parallelepiped	segmentation	photo-interprétation	20 m

*régions d'intérêt

Tableau 1. Méthodes de classifications pour différencier l'occupation de surface en 2009

En 1997, selon le type de surface, la mise à jour de la classification de 2009 par photo-interprétation nécessitait moins de temps de traitement que l'application de classifications et post-classification(s) avec ajout ou suppression de pixels. Cette démarche visait notamment les classes dont la radiométrie était caractéristique (riz, marais, salins, eau permanente...). Compte tenu de la résolution spatiale non adaptée aux vergers et serres, la forme de l'objet, la variation du signal et la dynamique locale du paysage entre 1997 et 2009 ont permis de définir une répartition des classes, mais les résultats restent aléatoires.

Classe	Type de classification	Post-classification	Modifications/création ROIs* ⇒ validation	Résolution spatiale
Prairies irriguées	supervisée, parallelepiped	clump classes, filter	photo-interprétation	20 m
Prairies sèches, coussoul	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Cultures d'hiver	bands rations	segmentation	photo-interprétation	20 m
Cultures d'été	bands rations	segmentation	photo-interprétation	20 m
Riz	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Vergers industriels irrigués	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Vergers industriels en jachère	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Autres vergers irrigués	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Vignes	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Oliviers	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Serres	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Autres cultures, jachère, friches agricoles	-	-	photo-interprétation à partir de "sol nu, sols artificialisés"	20 m
Plages, dunes de sable	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Marais maritimes et theys	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Salins	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Marais	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Eau permanente	-	-	MAJ 2009 par photo-interprétation	20 m
Garrigues dégradées, végétation clairsemée	= pixels non classés dans les autres classes	-	photo-interprétation	20 m
Garrigues, forêt, vég. semi-dense à dense	non supervisée, K-means	-	photo-interprétation	20 m
Sol nu, sols artificialisés	supervisée, parallelepiped	-	photo-interprétation	20 m

*régions d'intérêt

Tableau 2. Méthodes de classifications pour différencier l'occupation de surface en 1997

Pour obtenir les cartes d'occupation de surfaces non artificialisées, des classifications supervisées et non supervisées sont testées à l'aide du logiciel ENVI afin d'obtenir les résultats les plus fiables possibles. Comme les images SPOT disponibles en 1989, 1997, 2003 et 2009 sont majoritairement à 20 m de résolution spatiale, les travaux sont réalisés à cette résolution. La résolution géométrique des images à plus fine résolution spatiale (10 m) a donc été dégradée.

Les approches diffèrent selon le type d'occupation de surface. D'une manière générale, les classifications doivent mettre en évidence le plus grand nombre de pixels appartenant à une classe afin de limiter les traitements post-classifications.

Dans un premier temps, des classifications supervisées (distance minimum par exemple) s'appuyant sur les observations de terrain et des classifications non supervisées (K-means par exemple) ont été testées sur l'ensemble des bandes spectrales des images (ou sur les gammes spectrales les plus caractéristiques des objets recherchés) disponibles en 2009 à l'échelle du territoire de la Crau. Comme les résultats n'ont pas été concluants (confusion vergers secs ou arrachés et prairies sèches par exemple), une série de tests a été réalisée sur les bandes spectrales saisonnières (1 image multispectrale en mars, 1 en juin, 1 en

octobre par exemple), mais la confusion entre classes était encore grande et les traitements post-classifications fastidieux. Le choix de travailler par type d'occupation du sol s'est avéré plus intéressant : le principe est d'identifier les classes une à une en se concentrant sur un type de sol en particulier.

Pour les prairies irriguées, par exemple, une classification supervisée (parallelepiped classification) a donné des résultats assez pertinents sur la zone d'études. Le traitement post-classification a consisté à sélectionner manuellement les pixels correspondant à des prairies irriguées et à supprimer les pixels aberrants (masques). L'activité chlorophyllienne de mars à octobre était par exemple l'un des critères de sélection pour les pixels appartenant à la classe. Dans certains cas, le croisement d'informations avec la BD Ortho® de l'IGN et/ou l'image SPOT à très haute résolution spatiale a été utile pour identifier le type de sol. La production des cartes des prairies sèches, des cultures d'hiver (blé, orge) et de l'eau (mer, fleuve, bassins, canaux de navigation) est également basée sur des classifications supervisées avec sélection ou suppression manuelle des pixels. L'application de la méthode n'est toutefois pas garantie pour les classes en cours de traitement (cultures d'été, vergers secs, vergers irrigués, serres, maraîchages, bois, végétation clairsemée arbustive, zones humides, roches nues, plages et dunes). Les méthodes seront adaptées à l'objet recherché.

4) Résultats

Les cartes d'occupation de surfaces non artificialisées de la Crau en 1997 (Figure 3) et 2009 (Figure 4) sont disponibles au format BSQ (Band Sequential) à 20 m de résolution spatiale. En 2009, les classes de vergers secs et irrigués, serres, plages et dunes de sable sont disponibles à 2,5 m et 20 m de résolution spatiale.

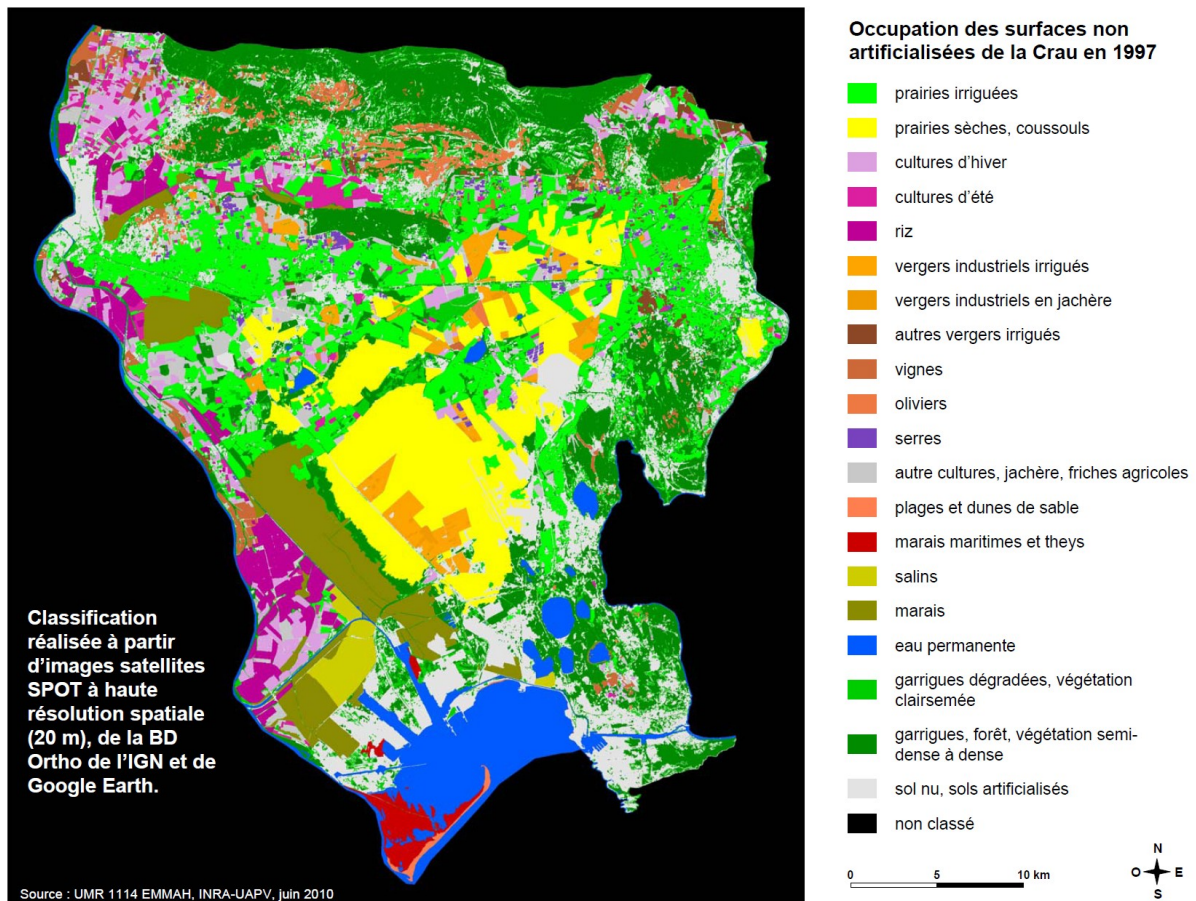


Figure 3. Carte d'occupation de surfaces non artificialisées de la Crau en 1997

Un identifiant est attribué à chaque type d'occupation de surface. Une classe peut donc être extraite indépendamment des autres et être intégrée, par exemple, dans un système d'information géographique (SIG). La fusion de n classes (6 et 21 par exemple) en fonction des besoins de modélisation et/ou de cartographie est également possible.

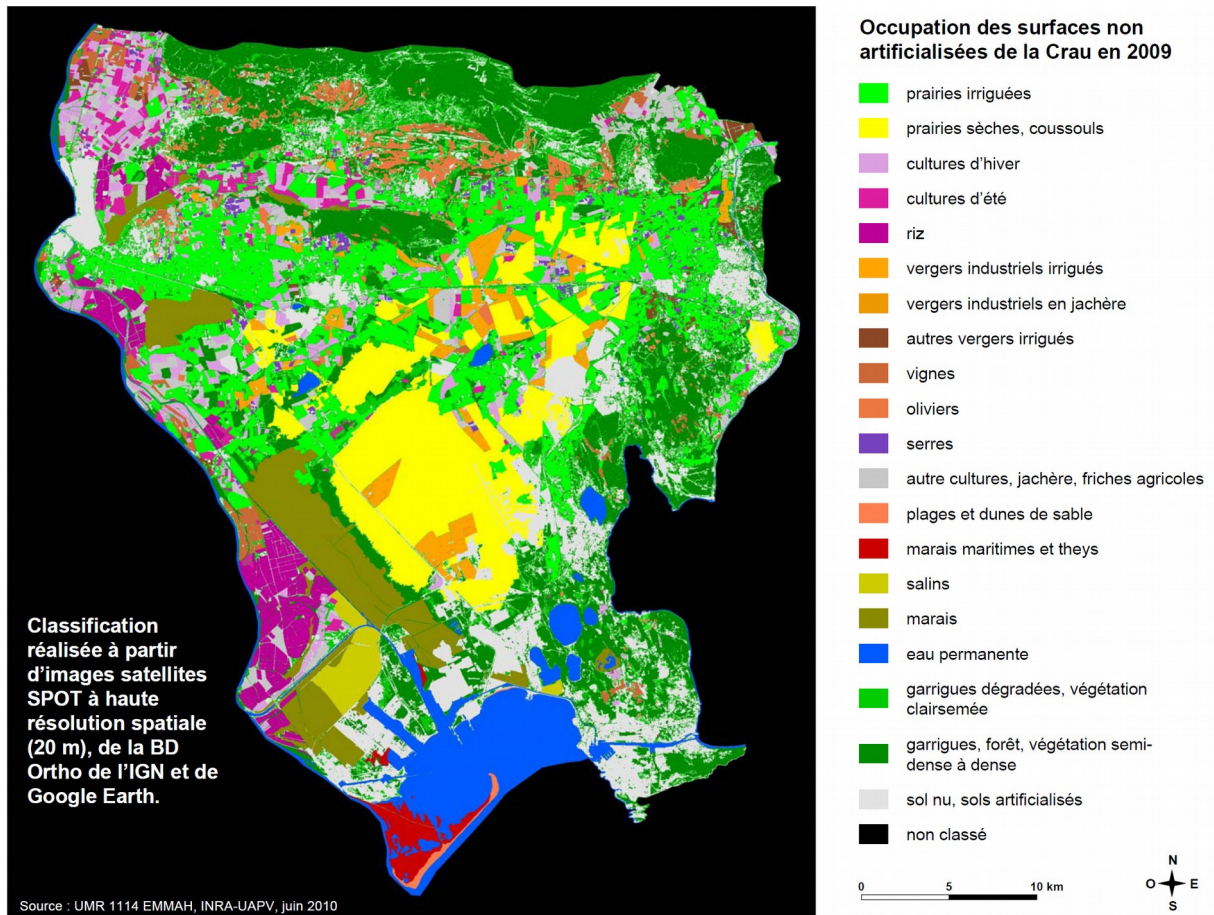


Figure 4. Carte d'occupation de surfaces non artificialisées de la Crau en 2009

B) Données agronomiques

1) sols

Le modèle STICS nécessite en entrée des données sur les sols permettant notamment de caractériser les réserves en eau disponibles pour la végétation. Ces caractéristiques sont :

- L'épaisseur de chaque horizon de sol,
- L'humidité à la capacité au champ,
- L'humidité au point de flétrissement,
- Le taux d'éléments grossiers,
- La densité apparente,
- Des caractéristiques de l'horizon de surface comme la teneur en argile, la teneur en azote organique, la teneur en calcaire, le pH et la profondeur de la couche minéralisante.

Une étape préliminaire à la spatialisation des types de sols sur la plaine de la Crau a consisté à calculer l'ensemble des variables nécessaires au fonctionnement de STICS pour chaque profil de sol disponible sur la carte pédologique d'Arles (Bouteyre and Duclos, 1994²)

² Bouteyre, G. and Duclos, G. (1994). Carte pédologique de France à 1/100000 : Arles. Editions, I. Olivet, INRA)..

Spatialement, les sols sur lesquels sont implantées les prairies ont été caractérisés en deux étapes :

- La première étape a consisté à distinguer, sur la carte pédologique d'Arles numérisée et la base de données regroupant les résultats de l'ensemble des sondages, les principaux types de sol dont les caractéristiques montrent des similarités.

- Pour les prairies irriguées, les profils de sol de la carte pédologique effectués sur les prairies montrent une grande hétérogénéité du fait de l'antériorité de l'irrigation qui a permis de reconstituer des sols grâce aux alluvions de la Durance. Une analyse basée sur le l'âge de la prairie a été effectuée à l'aide de différentes sources d'information et permis de spatialiser les sols.

1.1) Prétraitement des sondages de la carte pédologique

Les sondages de la carte pédologique d'Arles contiennent une information sur la profondeur de chaque horizon, la texture des sols, le taux d'éléments grossiers, la teneur en matière organique, le taux de calcaire et le pH.

L'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été calculées en utilisant une fonction de pédotransfert décrite par Wösten et utilisée à l'échelle européenne pour la base de données HYPRES:

L'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été calculées en utilisant les équations de Mualem Van Genuchten ([van Genuchten, 1980](#)) :

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad m = 1 - 1/n$$

e_rapport4_emmah_genuchten_ptf

Où :

ψ correspond à la hauteur d'eau,

$\theta(\psi)$ a été calculé pour ψ égale à 320 cm, correspondant à l'humidité à la

capacité au champ et ψ égale à 15800 cm soit PF(4.2) correspondant à

l'humidité au point de flétrissement.

Les différents paramètres de l'équation précédemment exposés sont estimées en utilisant les fonctions de pédotransfert décrites par Wösten et utilisée à l'échelle européenne pour la base de données HYPRES (Wösten, Lilly et al., 1999) :

$$\begin{aligned} \theta_s = & 0.7919 + 0.001691 * C - 0.26619 * D - 0.000001491 * S^2 + 0.0000821 * OM^2 + 0.02427 * C^{-1} \\ & + 0.01113 * S^{-1} + 0.01472 * \ln(S) - 0.000073 * OM * C - 0.000619 * D * C - 0.001183 * D * OM \\ & - 0.0001664 * \text{topsoil} * S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha = & -14.96 + 0.03135 * C + 0.0351 * S + 0.646 * OM + 15.49 * D - 0.192 * \text{topsoil} - 4.671 * D^2 \\ & - 0.000781 * C^2 - 0.00687 * OM^2 + 0.0449 * OM^{-1} + 0.06633 * \ln(S) + 0.1482 * \ln(OM) \\ & - 0.04546 * D * S - 0.4852 * D * OM + 0.00673 * \text{topsoil} * C \end{aligned}$$

$$n = -25.23 - 0.02195 * C + 0.0074 * S - 0.1940 * OM + 45.5 * D - 7.24 * D^2 + 0.0003658 * C^2 + 0.002885 * OM^2 - 12.81 * D^{-1} - 0.1524 * S^{-1} - 0.01958 * OM^{-1} - 0.2876 * \ln(S) - 0.0709 * \ln(OM) - 44.6 * \ln(D) - 0.02264 * D * C + 0.0896 * D * OM + 0.00718 * topsoil * C$$

(XXX equations mis dans le document : e_rapport4_emmah_wosten_ptf)

Où :

topsoil est un paramètre qui est égal à 1 pour l'horizon de surface et à 0 pour les horizons profonds,

C est le pourcentage d'argile,

S est le pourcentage de limon,

OM est le pourcentage de matière organique,

D est la densité apparente,

Les valeurs de densité apparente n'étant pas disponibles, une estimation a été effectuée. On considère que la densité apparente de l'horizon de surface est de 1.45 et que celle des horizons plus profonds est de 1.6, les sols n'étant jamais travaillés.

Cette étape a permis de constituer une base de données contenant l'ensemble des paramètres nécessaires au fonctionnement de STICS.

Les deux étapes suivantes ont eu pour objectifs de spatialiser les types de sol sur lesquels reposent les prairies, certaines unités pédologiques ayant des caractéristiques semblables.

1.2) Caractérisation et spatialisation des grands types de sol

Chaque unité pédologique a été caractérisée en effectuant une synthèse des sondages de la carte pédologique. Pour chaque unité pédologique, la moyenne des variables suivantes a été calculée :

-
- la profondeur de chaque horizon,
 - le taux d'argile,
 - le taux de limon,
 - le taux de sable,
 - le taux d'éléments grossiers,
 - l'humidité à la capacité au champ,
 - l'humidité au point de flétrissement.

A partir des données précédemment constituées, on en déduit que les prairies irriguées et les grandes cultures se retrouvent principalement sur trois types de sol (t_rapport4_emmah_caract_sol_uc et t_rapport4_emmah_nom_uc) :

- les sols fersiallitiques. Ces sols sont représentés sous trois unités cartographiques, la principale différence entre ces trois unités étant leur ancienneté, les paramètres les caractérisant étant très semblables,
- les sols dits complexes. Ces sols sont en réalité une évolution anthropique des sols fersiallitiques liés à l'irrigation. Ils reposent sur les précédents sols fersiallitiques et sont notamment caractérisés par une mise en culture de ces sols. Leur délimitation sur la carte est toutefois imprécise et les sondages montrent une grande hétérogénéité.
- Différents types de sols hydromorphes. Ces sols sont fondamentalement différents des précédents et s'ils montrent des caractéristiques relativement hétérogènes ont comme point commun d'avoir une réserve utile importante.

		Unité cartographique	Epaisseur en cm	Argile	Limon	Sable	Eléments grossiers (%)
Sols fersiallitiques	H1	63	36	22	42.5	34.72	44
		65	35	19.7	40.7	38.11	51
		66	41	18	39.17	41	50
		68	43	21.5	41.3	36.16	40
		69	23.75	15.25	41.5	44	40
	70	36.25	16.5	42	39.75	25	
	H2	63	27.5	16.25	34.375	46.75	61.25
		65	25	18.5	40.16	37.83	56
		66	31.6	15.7	35.4	45.5	45.5
		68	38	20.6	42.2	36.2	70
		69	33.75	18.25	35.25	44	62.5
	70	33.75	21	31.5	46.75	55	
		Unité cartographique	Epaisseur en cm	Argile	Limon	Sable	Eléments grossiers (%)
Sols hydromorphes	H1	12	40	42	50	6	
		55	16.6	30.66	60.66	8.33	0
		57	20	23.5	54.5	21.5	1
		67a	30	19	48.33	30.33	3.33
		70a	39	43.3	16.66	42.33	23.33
	H2	12	35	30	59	10	0
		55	46.66	35	55	9.33	0
		57	55	26	43	28	0
		67a	45	23.5	50.5	25.5	6.66
		70a	50	14	32.3	52.3	50
	H3	12	40	51	12	40	0
		55	56.66	50	14.3	56.66	0
		57	30	55.5	17	30	0
		67a	50	46.5	36.5	50	45
		70a	na	na	na	na	na

t_rapport4_emmah_caract_sol_uc

Légende : principales caractéristiques des unités cartographiques retenues par classes de sols

	N° d'unité cartographique	Classe de sol	Nom de l'unité cartographique
Sols fersiallitiques	63	Sols fersiallitiques	Sols d'épaisseur variable (30-60cm), limono-argileux à galets calcaires dominants et à encroutement dense mais peu épais : Vieille Crau ou haute Crau villafranchienne
	65		Sols d'épaisseur variable (20-70cm), limono-argileux à galets siliceux et calcaires ; encroutement épais et dur, "relief" sous terrain irrégulier : crau rissienne de luquier
	66		Sols généralement peu épais (10-30cm), limono-argileux à galets calcaires dominants, sur poudingue continu et épais : Gorands Coussous de la Crau würmienne de Miramas
	68	Sols complexes (sols irrigués de Crau, sur limons calcaires de la Durance, superposés ou en mélange et apportés par les eaux des canaux)	Crau villafranchienne : sols limoneux gris d'épaisseur variable (25-60cm) reposant sur des sols fersiallitiques à réserve calcaïque
	69		Crau rissienne : sols limono-argileux, moins limoneux que les précédents, car plus récemment mis en culture
	70		Crau würmienne : sols très remaniés et à encroutage partiel, très récemment mis en culture
	N° d'unité cartographique	Classe de sol	Nom de l'unité cartographique
Sols hydromorphes	12	Sols hydromorphes moyennement organiques	Sols argileux à argilo-limoneux des marais en bordure des reliefs limitant le delta
	55	Sols hydromorphes minéraux	Sols limoneux à limono-argileux des alluvions du Vigueirat et de la Meyre
	57		Sols limoneux à limono-argileux, à nodules ou amas calcaires et passées tourbeuses sur alluvions pallustres du marais des Baux
	67a	Sols hydromorphes moyennement organiques	Sols humiques à grey reposant sur des cailloutis de Crau
	70a	Sols complexes	Sols complexes (crau wurmienne) à caractères marqués d'hydromorphie

t_rapport4_emmah_nom_uc

Dénomination des unités cartographiques

Les sols complexes ont été regroupés avec les sols fersiallitiques. Seules les caractéristiques de l'horizon de surface ont été conservées et mis à jour avec les différentes analyses effectués après l'établissement de la carte pédologique.

Les grandes cultures sont essentiellement localisées dans des zones de bas-fonds correspondant à des sols dits « hydromorphes ».

On considère que les prairies se développent sur des sols « hydromorphes » et des sols « fersiallitiques » sur lesquels un horizon de surface limoneux s'est développé, les caractéristiques de cet horizon correspondant à celle de l'horizon A des sols complexes.

1.3) Spatialisation de l'horizon A des prairies irriguées.

L'épaisseur de l'horizon A des prairies irriguées dépend de la première mise en culture, les eaux de la Durance étant chargés en limon, un dépôt à lieu à chaque irrigation et une accumulation a vu le jour au cour du temps.

Des données historiques sur l'occupation du sol ont été acquises afin de dater l'ancienneté des cultures.

Trois données d'occupation du sol ont été utilisées :

- La carte de Cassini, datant approximativement de 1783, est la première cartographie de France, à l'échelle du 1/86400. Premier ouvrage de ce genre, elle contient une information très sommaire sur l'occupation du sol (figure f_rapport4_emmah_cassini).
- Une image Landsat MSS datant du 03/10/1975, une des premières images satellite acquise sur la plaine de la Crau ayant une résolution spatiale de 60m,
- la classification de l'occupation du sol de l'année 2009 dont les caractéristiques ont été exposées précédemment.

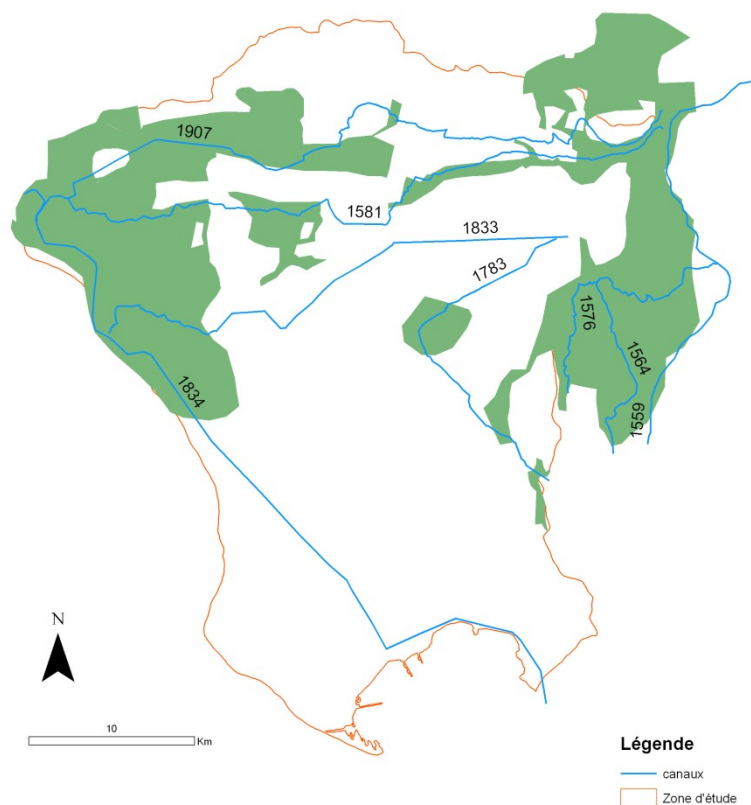


f_rapport4_emmah_cassini

Légende : Carte de Cassini de la plaine de la Crau géoréférencées.

Sur chacune de ces cartes, les zones cultivées ont été identifiées.

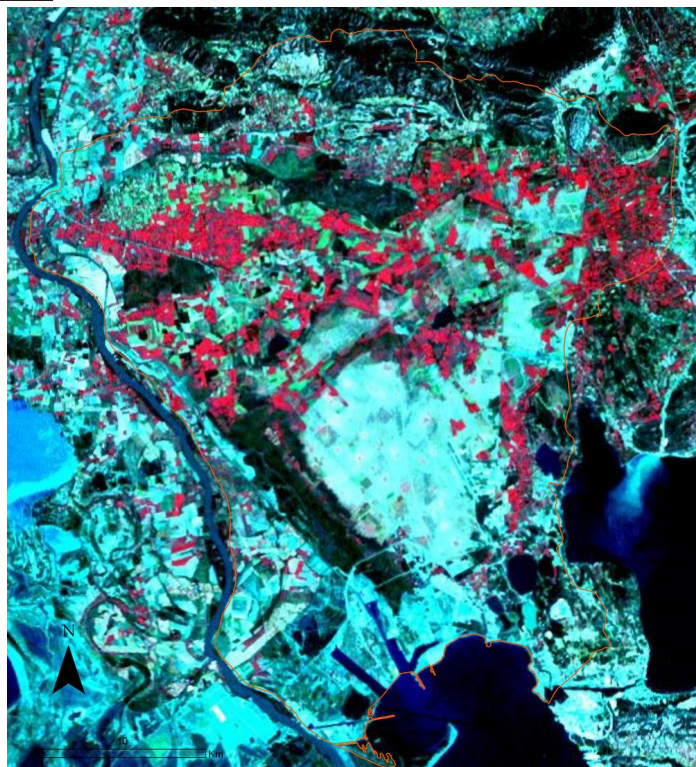
Sur la carte de Cassini, il a été considéré que les zones apparaissant en blanc étaient cultivées en 1793. Ces zones sont notamment présentes aux environs des canaux déjà existant avant cette date notamment le canal de Craonne branche d'Istres et le canal de Craonne branche d'Arles. Les autres zones cultivées correspondent plus généralement à des zones de bas-fonds dont les sols sont marqués par de l'hydromorphie (figure f_rapport4_emmah_prairies_1783)



f_rapport4_emmah_prairies_1783

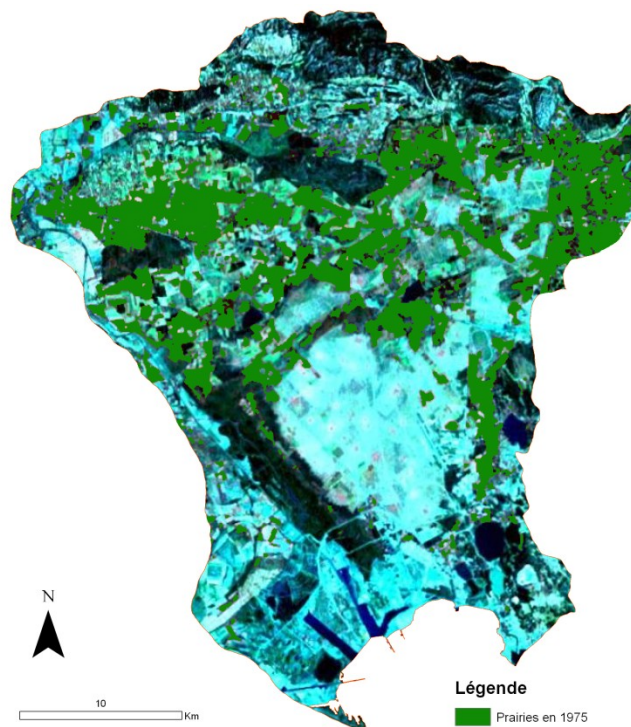
Légende : les zones potentiellement cultivées en 1793 (en vert) d'après la carte de Cassini et les dates de construction des principaux canaux d'irrigation.

L'image Landsat de 1973 a été traitée afin de classifier l'ensemble des prairies et des cultures existantes à cette date (f_rapport4_emmah_landsat). Une simple classification utilisant la méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée. Sur cette image, il est possible de distinguer clairement les prairies irriguées du reste de l'occupation du sol. La classification obtenue est présentée en figure f_rapport4_emmah_prairies_1975.



f_rapport4_emmah_landsat

Légende : Image landsat du 03/10/1975. Les surfaces en rouge correspondent aux prairies irriguées et en vert aux autres cultures.



f_rapport4_emmah_prairies_1975

Légende : Résultat de la classification des prairies (vert) à partir de l'image Landsat de 1975

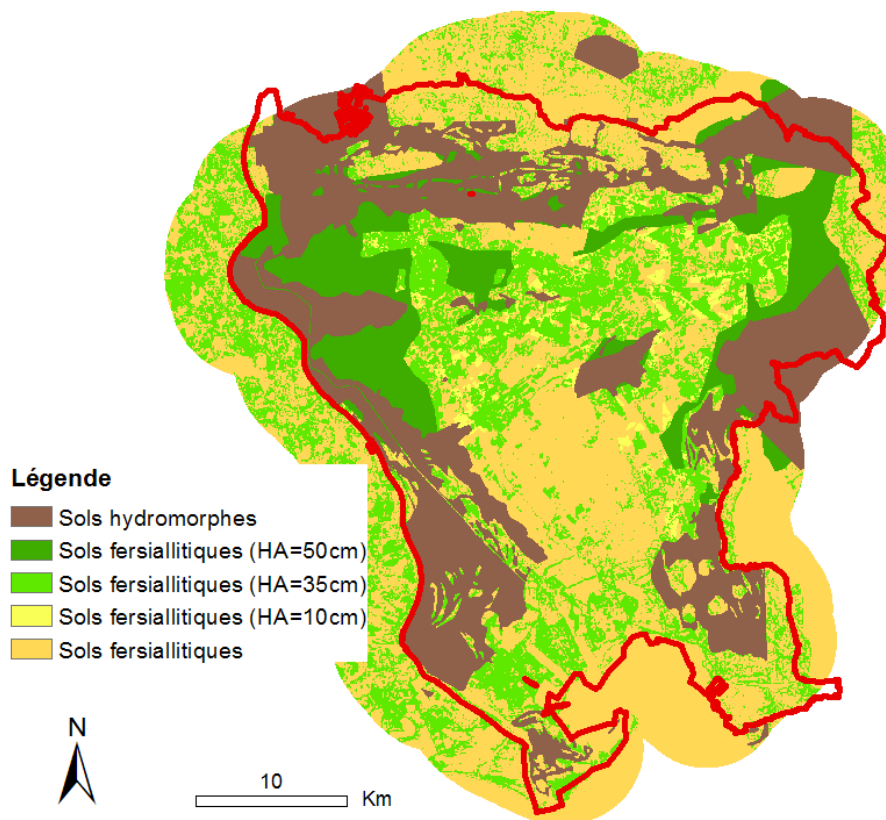
Enfin la classification de l'occupation du sol de l'année 2009 a été utilisée pour spatialiser les prairies existantes à l'heure actuelle et mettre en évidence celles qui auraient été mises en culture entre 1975 et 2009.

Les épaisseurs des horizons A sur sols fersiallitiques ont été définies comme exposées dans le tableau T_rapport4_emmah_epaisseur_sol_prairie:

Date de première mise en	Epaisseur en cm

1.4) Finalisation de la carte des sols

Enfin l'ensemble des zones ne correspondant pas à des sols hydromorphes ou n'ayant jamais été cultivées ont été insérées dans une dernière classe ayant les caractéristiques des sols fersiallitiques sans l'horizon développé sur les surfaces cultivées. La carte obtenue est présentée en figure f_rapport4_emmah_carte_sols.



f_rapport4_emmah_carte_sols

Légende : Carte des sols établie pour le fonctionnement du modèle STICS sur la plaine de la Crau

Les caractéristiques des sols ont été recalculées en moyennant les paramètres de l'ensemble des sondages sur sols fersiallitiques et sur sols hydromorphes. Les caractéristiques de ces sols sont présentées dans le tableau

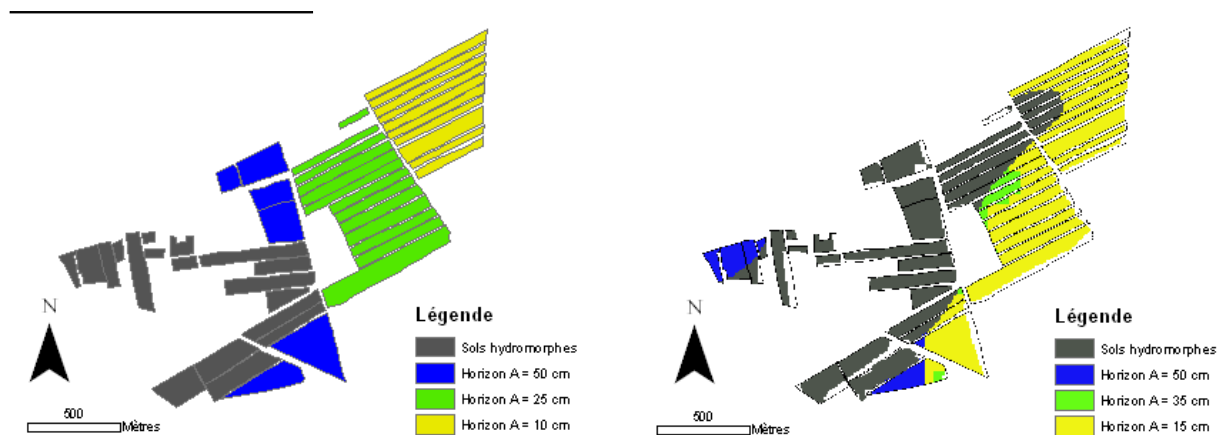
t_rapport4_emmah_caract_sol_stics

	Horizon	Epaisseur de l'horizon	Humidité à la capacité au champ (%)	Humidité au point de flétrissement (%)	Densité apparente	Eléments grossiers (%)
Sol hydromorphes	1	21.6	29.4	14.9	1.45	4
	2	42	28.1	16.5	1.6	7
	3	51.2	28.8	16.8	1.6	11.25
Sols fersiallitiques (HA=50cm)	1	50	26	12.1	1.45	10
	2	31	25.3	13.5	1.6	55
	3	50	25.3	13.5	1.6	75
Sols fersiallitiques (HA=35cm)	1	35	26	12.1	1.45	10
	2	31	25.3	13.5	1.6	55
	3	50	25.3	13.5	1.6	75
Sols fersiallitiques (HA=10cm)	1	10	26	12.1	1.45	10
	2	31	25.3	13.5	1.6	55
	3	50	25.3	13.5	1.6	75
Sols fersiallitiques	1	31	25.3	13.5	1.6	55
	2	50	25.3	13.5	1.6	75

t_rapport4_emmah_caract_sol_stics

Légende : Caractéristiques des sols tels définis pour les simulations STICS

Le résultat obtenu a été confronté à une étude de terrain menée sur le domaine de Suffren où nous avons caractérisé les sols sur l'ensemble des prairies du domaine et notamment l'épaisseur de premier horizon de surface.



f_rapport4_emmah_sols_suffren

Légende : A gauche : sols définies suivant l'enquête de terrain sur le domaine de Suffren. A droite : extrait de la carte des sols constituée pour le fonctionnement de STICS à l'échelle de la plaine de la Crau

La confrontation montre que les principaux sols ont été identifiés avec notamment une représentation satisfaisante des sols hydromorphes. Par contre, on constate qu'un certain nombre de parcelles mises en prairie récemment ont des profondeurs sous-estimées. Cela vient du fait que certaines prairies ont été installées sur des parcelles de verger qui autrefois étaient également irriguées par irrigation gravitaire. De ce fait, les apports de limon sont antérieurs à la mise en prairie. Il aurait donc fallu repérer les vergers irrigués avec irrigation gravitaire, ce qui est beaucoup moins évident à faire sur l'image SPOT de 1975.

2) Météorologie:

Le modèle STICS nécessite différentes données météorologiques journalières permettant de simuler le développement d'une plante :

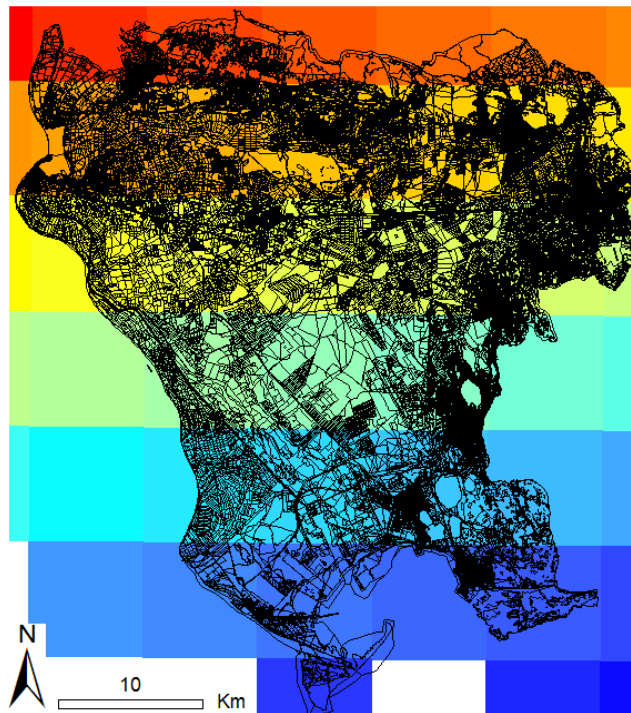
- Les précipitations
- Les températures minimum et maximum,
- Le rayonnement global,
- La vitesse du vent,
- La tension de vapeur moyenne.

L'objectif étant de spatialiser le modèle sur l'ensemble de la plaine de la Crau deux manières d'utiliser le modèle ont été implémentées :

- En utilisant une donnée ponctuelle provenant d'une station météorologique
- En utilisant provenant de modèles spatialisés telles que les données issues de la base de données SAFRAN de Météo France.

Pour ASTUCE & TIC, les données de la station météorologique du domaine du Merle maintenue par l'unité Agroclim de l'INRA d'Avignon ont été utilisées. Les données journalières sur la période 2000-2010 ont été acquises. Le choix d'utiliser les données d'une station météorologique a été effectué dans l'objectif d'être en accord avec les données utilisées pour les simulations prospectives sur la période 2025-2035 pour laquelle une donnée non spatialisée est disponible sur l'ensemble de la Crau.

Le modèle a également été mis au point afin d'utiliser un modèle météorologique spatialisé. Les données SAFRAN sont disponibles à une échelle horaire sur l'ensemble de la France et ont une maille de 8km. Elles ont été acquises sur la période 2005-2009. Les données des mailles de la grille SAFRAN localisées sur la plaine de la Crau ont été extraites de la base de données. Par la suite, chaque parcelle a été associée à la maille SAFRAN correspondante (figure f_rapport4_emmah_safran_maille). SAFRAN étant un modèle horaire, les données ont été agrégées afin d'obtenir des données journalières utilisables pour le modèle STICS.



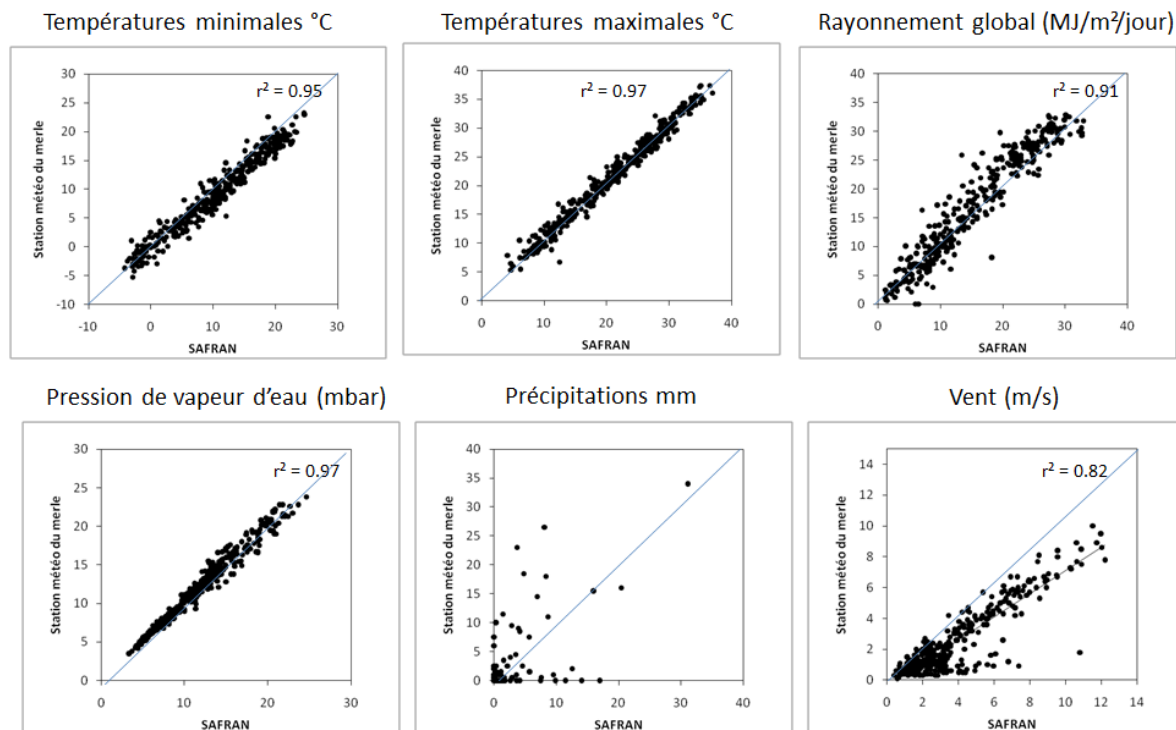
f_rapport4_emmah_safran_maille

Légende : Superposition des mailles SAFRAN au parcellaire de la plaine de la Crau.

Une comparaison entre les données SAFRAN et les données de la station météorologique du domaine du Merle a été effectuée pour l'ensemble des données journalières de l'année 2006. On observe dans l'ensemble une bonne relation entre les données de la station météorologique du Merle et les données SAFRAN correspondante. Deux variables montrent toutefois des différences (figure f_rapport4_emmah_safran_comp):

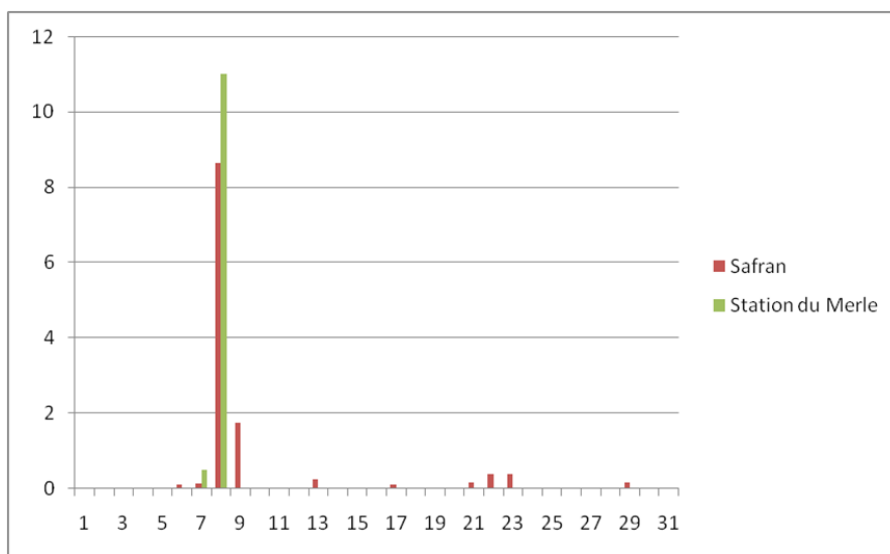
- Le vent a tendance à être surestimé par SAFRAN. Les différences peuvent notamment s'expliquer par une forte variabilité locale et des phénomènes aérologiques locaux dépendant de l'environnement de la station météorologique.

- La relation entre les précipitations est faible voire inexistante. Ceci est dû au fait que le calcul des précipitations journalières pour la station météorologique du domaine du Merle est effectué de 6h du matin à 6h du matin le jour suivant. Les précipitations ont été calculée 0h à 24h pour les données SAFRAN. En comparant les deux séries de données de précipitations, on observe bien un décalage d'un jour (figure f_rapport4_emmah_P_safran_merle).



f_rapport4_emmah_safran_comp

Légende : Comparaison entre les données SAFRAN et les données de la station météorologique du domaine du Merle pour l'année 2006.



f_rapport4_emmah_P_safran_merle

Légende : Comparaison entre les précipitations journalières issues des données SAFRAN et mesurées à la station météorologique du domaine du Merle pour le mois de mai 2006.

Légende : Comparaison entre les séries de précipitations issues des données SAFRAN et de la station météorologique du domaine du Merle pour le mois de mai 2006.

3) Itinéraires techniques

L'objectif est de pouvoir prescrire les itinéraires techniques sur l'ensemble des parcelles du territoire. L'itinéraire technique décrit la succession des interventions qui permettent de mener la culture à son terme (type de culture,

date de semis, fertilisation, irrigation, récolte). On notera ici que les opérations liées à la protection des cultures ne sont pas prises en compte. En effet, l'état sanitaire des cultures et les moyens de lutte ne sont pas actuellement représentés dans le modèle de culture. En ce qui concerne les cultures que nous avons choisi de représenter, nous sommes limités à un itinéraire technique standard pour les grandes cultures (blé pour les cultures de printemps et tournesol pour les cultures d'été). Cela signifie que toutes les parcelles ont été cultivées de la même manière et que les interventions ont été réalisées partout en même temps. Par contre sur les prairies irriguées, compte-tenu de leur importance économique (culture majoritaire) et environnementale (contributeur principal à la recharge de la nappe), nous avons choisi de représenter la variabilité des pratiques à l'échelle de la parcelle en nous focalisant sur l'irrigation et les coupes. Vu le nombre très important de parcelles, il est impossible d'explicitier pour chaque parcelle l'ensemble des dates d'intervention. Nous avons donc privilégié une approche statistique consistant à déterminer les lois de probabilité des différentes interventions et de les répartir sur les parcelles par un tirage aléatoire. Ces lois de probabilité tiennent compte de cofacteurs tels que le sol, le climat ou la dimension des parcelles lorsque cela est pertinent.

3.1) le parcellaire (a réactualisé par le travail de sylvain)

Chaque parcelle est caractérisée par un usage spécifique qui renvoie à des des caractéristiques propres que : les types de sols, les itinéraires techniques (dates de coupes, dates et doses d'irrigation, apports d'engrais). Il a été choisi de faire fonctionner le modèle STICS à l'échelle de la parcelle dans l'objectif de spatialiser les différents indicateurs tels que l'évolution des rendements et du drainage.

Le parcellaire de l'ensemble de la zone d'étude a été numérisé en utilisant plusieurs sources d'information :

- Le cadastre de l'ensemble des communes couvrant la zone d'étude, acquis auprès du CRIGE (Centre Régional de l'Information Géographique) de la région PACA
- Une image SPOT HRG datant du 29 juin 2009 à 2,5m de résolution.

L'ensemble des données cadastrales acquises au format dxf ont été converties au format shp. Le cadastre acquis sous cette forme ne contient que les limites de parcelles. L'ensemble des données correspondant aux parcelles n'ont pas été acquises et ne sont pas associées aux parcelles.

Une fois les données cadastrales de l'ensemble des communes converties, celles-ci ont été fusionnées pour ne conserver qu'un seul fichier couvrant l'ensemble de la zone d'étude.

Une parcelle cadastrale ne représente pas un seul type d'occupation du sol de même qu'une parcelle agricole ne correspond pas à une parcelle cadastrale. Deux opérations ont été effectuées à partir du plan cadastral :

- Une opération de fusion des parcelles cadastrales correspondant à des parcelles agricoles (des parcelles du même type d'occupation du sol) à l'aide de l'image SPOT de juin 2009,
- Des opérations de découpage des parcelles cadastrales couvrant plusieurs types d'occupation du sol également à partir de l'image SPOT de juin 2009.

Au total, sur l'ensemble du site d'étude, le parcellaire regroupe 176263 parcelles cadastrales. Notons que le travail de fusion n'ont concerné que les parcelles agricoles et non les parcelles de surfaces artificialisées.

Deux informations supplémentaires ont également été ajoutées au parcellaire dans l'objectif de faire fonctionner le modèle STICS, la longueur et la largeur des parcelles. Ces deux informations permettent notamment de calculer la dose d'irrigation. La longueur et la largeur des parcelles sont estimées en utilisant un script utilisable sous ArcGIS : <http://resources.arcgis.com/gallery/file/Geoprocessing-Model-and-Script-Tool-Gallery/details?entryID=3D230972-1422-2418-34A5-2F3FFF97C238>

Le script trace un rectangle délimitant chacune des parcelles et calcul par la suite la longueur et la largeur de ces rectangles. Ces données ont par la suite été jointes au parcellaire.

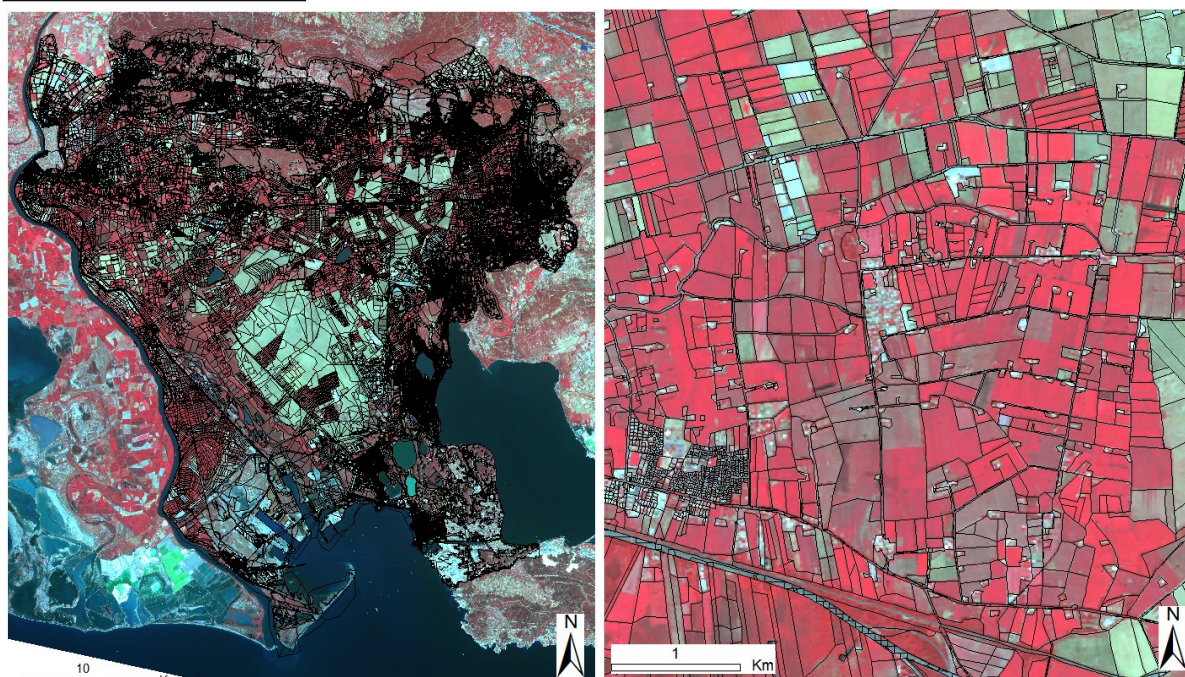


Figure 5 : Parcellaire utilisé sur l'ensemble du site d'étude (gauche) et extraction sur une zone cultivée en prairies (droite)

3.2) Itinéraires techniques

3.2.1 Les grandes cultures

Deux types de culture ont été associés aux grandes cultures :

- Le blé pour les cultures d'hiver
- Le tournesol pour les cultures d'été

Les itinéraires techniques des parcelles de blé ont été déterminés en utilisant les données récoltées auprès de quatre exploitants agricoles sur les dates des principales interventions et la fertilisation.

Les itinéraires techniques des parcelles de tournesol ont quant à eux été déterminés à dire d'expert, aucun itinéraire technique n'ayant été récolté auprès

des exploitants enquêtés.

Le tableau t_rapport4_emmah_itk_gde_culture met en évidence les principales interventions ayant lieu sur ces deux types de culture.

	Blé	Tournesol
Date de semis	15-déc	05-avr
Date de récolte	22-juin	11-sept
Date de fertilisation 1	15-déc	17-avr
Unités d'azote 1	30	60
Date de fertilisation 2	06-mars	15-mai
Unités d'azote 2	70	100

t_rapport4_emmah_itk_gde_culture

Légende : Itinéraires techniques utilisés pour la modélisation des cultures de blés et de tournesol.

Les cultures de tournesol ont été considérées comme étant irriguées à raison de deux irrigations de 50 mm, la première le 21 juin et la seconde le 18 juillet.

3.2.2 Les prairies

3.2.2.1 la fertilisation

La fertilisation des prairies intervient sous 3 formes :

- Le fumier des brebis qui pâturent les prairies irriguées durant l'hiver,
- Les apports d'engrais ayant lieu après la première coupe,
- Les apports de nitrates ayant lieu lors de chaque irrigation.

a) Le fumier de brebis

Les apports de fumier de brebis constituent la première source de fertilisant pour les prairies irriguées. Les quantités d'azote ont été estimées à partir de la quantité de fumier produite par les brebis et par le nombre de brebis qui vont pâturer sur un hectare de prairies. On considère que chaque brebis produit

environ 3kg de fumier par jour, les brebis n'étant pas en lactation durant l'hiver (<http://www.agrireseau.qc.ca/ovins/Documents/Rapport%20final%20%C3%89valuation%20de%20la%20quantit%C3%A9%20et%20de%20la%20valeur%20fertilisante%20des%20fumier%20ovins.pdf>). Environ 100 brebis pâturent un ha pendant 10 jours (source : communication orale avec François Charron). On considère donc un apport de 3 t/ha de fumier contenant 78 % d'eau avec un rapport C/N de 15 et une proportion de carbone de 42 %. Nous considérons que sur l'ensemble des parcelles cet apport a lieu en fin d'hiver, mi-février après le dernier passage des brebis.

b) Les apports d'engrais

Les apports d'engrais ont été estimés en effectuant plusieurs enquêtes auprès des agriculteurs. L'ensemble des enquêtes effectuées auprès de 3 exploitants montrent que la fertilisation a lieu après la première coupe sous la forme de nitrate d'ammonium et que la dose apportée est approximativement de 20 unités. La date de fertilisation est généralement située deux ou trois jours après la première irrigation qui succède la coupe. Les apports n'ont pas lieu sur chaque parcelle. Il est difficile d'observer une loi concernant le choix des parcelles fertilisées. La proportion des parcelles fertilisées au sein d'une exploitation est variable d'une année sur l'autre. Certaines parcelles peuvent être fertilisées deux années de suite ou plus, et d'autres ne sont jamais fertilisées.

La croissance des prairies telle que simulée avec STICS lors de la deuxième pousse est conditionnée par les apports d'azote effectués après la première coupe.

Ainsi, il a été choisi d'effectuer un apport de 20 unités d'azote sur l'ensemble des parcelles après la première coupe, cet apport intervenant deux jours après la première irrigation qui succède la première coupe.

c) Les nitrates de l'eau d'irrigation

Enfin l'eau d'irrigation fournis également de l'azote, les quantités d'eau apportées à chaque irrigation étant en moyenne de 150mm, les apports de nitrates sont conséquents. D'après les analyses effectuées en 2010 en 16 points différents, la quantité moyenne de nitrate contenu dans les eaux d'irrigation est de 0.0469 mmol/l, ce qui équivaut à 0.029 kg d'azote par mm d'eau (Ref : Er Ray Houssine). Ainsi, pour une irrigation de 150mm, l'apport d'azote est de 4.36

unités.

3.2.2.2 L'irrigation

L'irrigation des prairies irriguées est définie en fonction de différents critères. Le premier, le tour d'eau, va définir la fréquence à laquelle les parcelles sont irriguées. Les dates de début et de fin d'irrigation sont définies par le décret portant l'AOC du foin de Crau. Toutefois, en fonction des précipitations, les dates de début et de fin d'irrigation sont décalées chaque année. De même certaines irrigations n'ont pas lieu suivant les quantités d'eau précipitées. Enfin, la dose d'eau apportée lors d'une irrigation varie en fonction des parcelles.

a) Calendrier d'irrigation : les tours d'eau

La distribution spatiale des tours d'eau est déterminée en fonction de l'appartenance des parcelles à une Association Syndicale d'Arrosants (ASA). Les limites des ASA ont été récupérées auprès de la chambre d'agriculture. Certaines ASA se chevauchent et en conséquence les limites des différentes ASA ont été modifiées de sorte qu'il n'y ait pas de recouvrement (figure f_rapport4_emmah_asa). L'information sur le tour d'eau de chaque ASA a été associée à la couche vectorielle délimitant les ASA (tableau t_rapport4_emmah_asa). Le tour d'eau de chacune des parcelles de prairies a été défini en fonction de l'appartenance d'une parcelle à une ASA. Pour les parcelles se trouvant en dehors du périmètre des ASA, un tour d'eau de 10 jours a été défini, ce qui est généralement observé sur les parcelles de prairies.

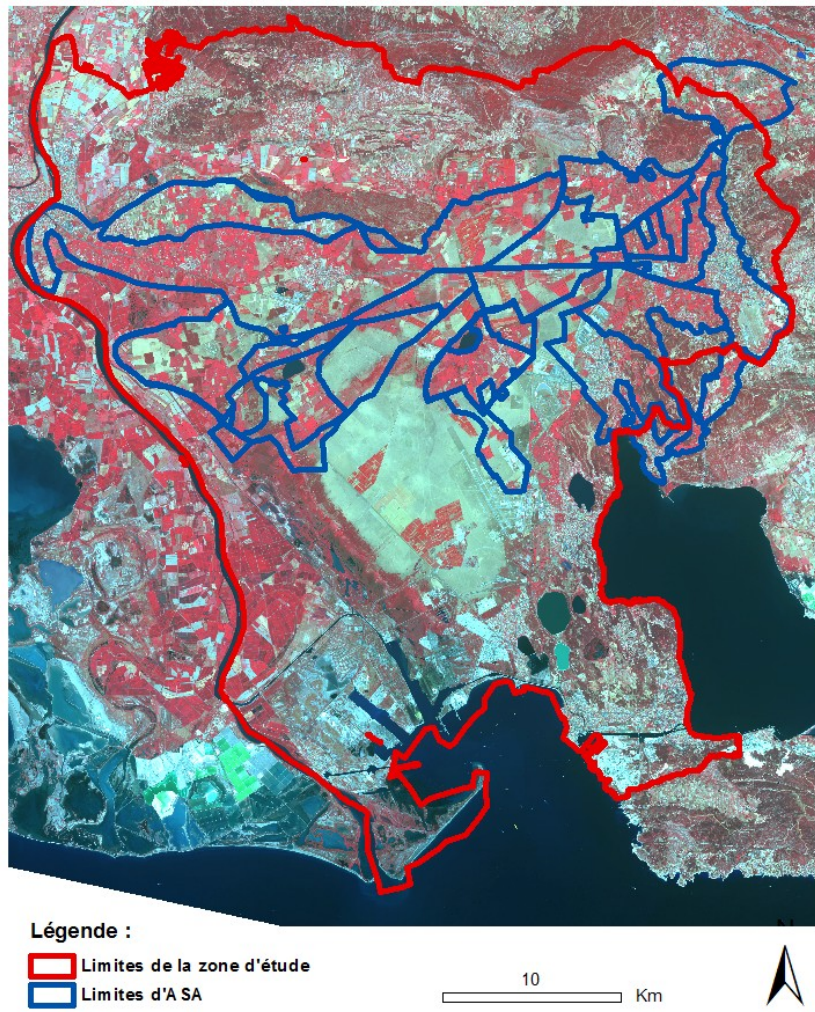


figure f_rapport4_emmah_asa

Légende : Délimitation de la zone d'étude et des ASA

Nom de l'ASA	Tour d'eau en jour
ASA d'irrigation la Haute Crau	8
Arrosages communaux de Salon	8
ASA des arrosants de la commune d'Eyguieres	10
ASA des arrosants de la commune de Grans	10
ASA du Canal des Alpines a Salon	8
ASL du Canalet et du Canal du Congres	9
ASL des arrosants de la Cabane a Salon	8
ASA des arrosants de Cornillon-Confoux St Chamas	10
Arrosages communaux de Miramas	10
ASA de Corps des arrosants de Saint Chamas	7
ASA des arrosants de l'Etang d'Entressen a Istres	10
ASA du Canal de Langlade	10
ASA du Rageyrol de Vergiere	10
ASA des arrosants de la Crau	10

t_rapport4_emmah_asa

Légende : Tour d'eau des Associations Syndicales d'Arrosant de la plaine de la Crau.

b) Calendrier d'irrigation : définition de la période d'irrigation

La période d'irrigation des prairies irriguées s'étend de mars à octobre d'après le décret portant l'AOC du foin de Crau. Toutefois, les dates de début et de fin d'irrigation varient en fonction des précipitations.

Des enquêtes ont été effectuées chez différents exploitants agricoles afin de récupérer les dates d'irrigation de chacune des parcelles de prairies irriguées. Ces enquêtes ont servis à déterminer la date de début et de fin des irrigations ainsi que les conditions pour lesquelles les exploitants sautent un tour d'eau.

La date de début des irrigations est déterminée en fonction du cumul des précipitations du mois de janvier :

$$date_{irr1} = 0.2974 \times \sum_{j=1}^{j=31} P_{mm} + 77.2886$$

La date de fin des irrigations est fixée au premier jour du mois de septembre pour lequel des précipitations supérieures à 30mm sont observées.

Un calendrier nominal des irrigations est construit entre la date de début et la date de fin des irrigations précédemment identifiées.

Spatialement, on considère que pour chacune des ASA, une fraction équivalente de surface est irriguée chaque jour, cette fraction étant déterminée en fonction du tour d'eau. Si le tour d'eau est de 10 jours, 1/10^{ème} de la surface de l'ASA est irriguée chaque jour. Les parcelles sont sélectionnées de manière aléatoire sur le plan spatial. Le tirage des parcelles ne suit aucune logique spatiale.

c) calendrier d'irrigation : interaction avec les précipitations

Une fois le calendrier nominal des irrigations bâti, le cumul des précipitations sur une période de 9 jours précédents chaque irrigation est calculée. Lorsque ce cumul est supérieur à 40mm, on considère que les exploitants agricoles sautent l'irrigation.

d) détermination de la dose d'irrigation

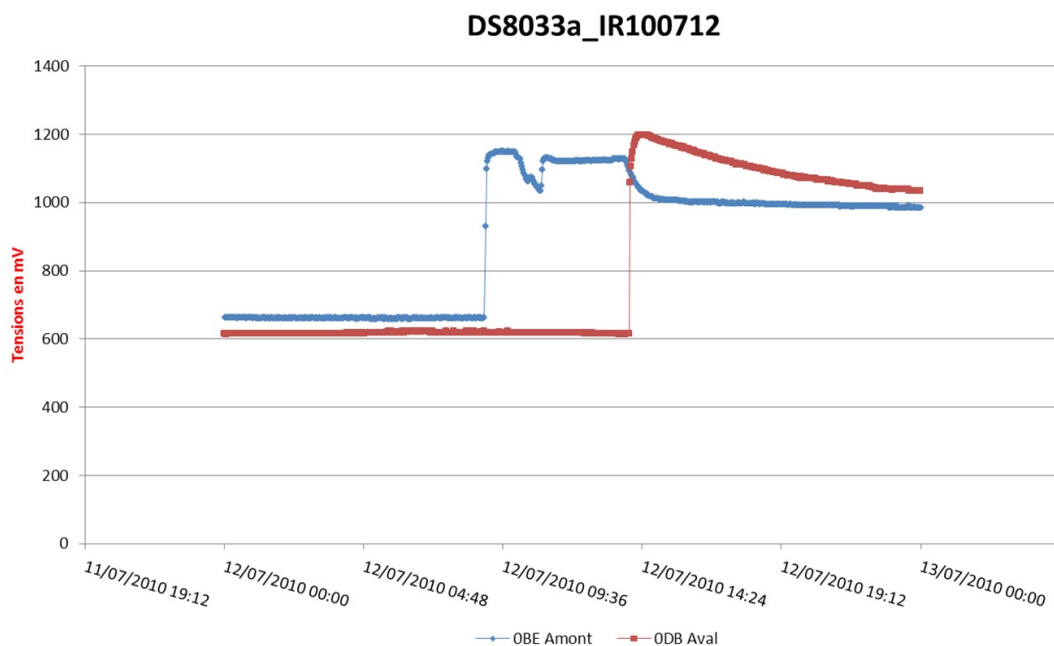
Les doses d'irrigation ont été déterminées en effectuant des expérimentations sur le terrain ainsi que par l'utilisation de modèles.

Utilisation des données acquises sur le terrain

Une campagne de terrain a été effectuée dans l'objectif de déterminer les doses d'irrigation pour un ensemble de parcelles sur les domaines du Merle et de Suffren. L'objectif était de déterminer la durée des irrigations, le débit d'entrée étant approximativement connue et aucun moyen abordable ne pouvant être mis en œuvre pour le calculer, et la surface des parcelles étant également connu.

Les expérimentations ont été effectuées à l'aide de sondes capacitives Echoprobe EC-20 [© Decagon Device]. Ces sondes mesurent la constante

diélectrique du sol. L'augmentation abrupte de la constante diélectrique permet de dater l'arrivée d'une lame d'eau sur un sol. Pour chaque parcelle suivie, une sonde a été placée en amont afin de dater le début et la fin de l'irrigation et une en aval afin de mesurer la vitesse d'avancement de la lame d'eau. A chaque épisode d'irrigation, les sondes permettent de dater la date et l'heure de début et de fin d'irrigation (figure f_rapport4_emmah_sonde_irr). Le temps d'irrigation ainsi calculé a été utilisé pour calculer des doses d'irrigation sur chacune des parcelles.



f_rapport4_emmah_sonde_irr

Légende : Exemple de signal Amont/Aval recueilli sur une parcelle de prairie au domaine de Suffren par les sondes Echoprobe EC-20

La débit d'entrée des parcelles a été estimée en menant une enquête auprès des agriculteurs. La surface des parcelles a quant à elle été déterminée à l'aide du

parcellaire obtenu sur la plaine de la Crau.

A l'aide de ces données, la lame d'eau irriguée a été estimée de la manière suivante :

$$\text{Dose} = (\text{débit} \times \text{temps}) / \text{surface}$$

Calcul de la dose d'irrigation par modélisation

La dose d'irrigation a également été estimée à l'aide d'un modèle 1D « CALHY1 » développé par Jean-Claude BADER. Le modèle calcul la dose en prenant compte des variables suivantes :

- Les géométries de la prairie (longueur, largeur et surface) en mètres,
- Le débit injecté en amont en l/s,
- La durée totale de l'irrigation en heures,
- L'épaisseur de l'horizon A en mm,
- La pente de la prairie.

Les doses mesurées et modélisées pour l'ensemble des parcelles suivies sont présentées dans le tableau t_rapport4_emmah_dose_irr

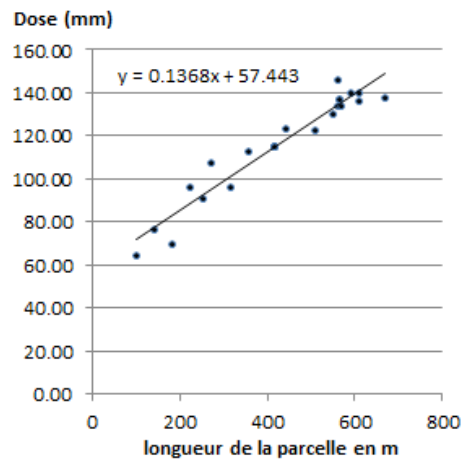
Nom de la parcelle	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie de la parcelle (ha)	Superficie du calan (ha)	Vitesse d'avancement de la lame d'eau (m/h)	Débit d'entrée (l/s)	Durée d'irrigation de la parcelle (heures)	dose d'irrigation (mm)	
								Dose calculée	Dose modélisée
6N	356.8	81.28	2.90	1.40	60.47	120	5.83	180.00	112.80
1J	416.54	91.23	3.80	1.90	56.50	150	7.73	219.79	115.26
1J	416.54	91.23	3.80	1.90	61.56	150	6.73	191.37	115.26
6K	566.91	75.85	4.30	2.10	80.22	120	7.07	141.99	136.84
6K	566.91	75.85	4.30	2.10	101.23	120	5.60	115.20	136.84
1J	416.54	91.23	3.80	1.90	54.39	150	8.03	228.32	115.26
1J	416.54	91.23	3.80	1.90	55.31	150	7.90	224.53	115.26
1J	416.54	91.23	3.80	1.90	52.75	150	8.28	235.42	115.26
1J	416.54	91.23	3.80	1.90	68.09	150	6.42	182.37	115.26
Bergerie IV	510.19	64.29	3.28		33.49	100	15.23	167.20	122.49
Saules 1	563.01	46.18	2.60		80.82	160	6.97	154.34	146.06
paddock II	442.61	79.98	3.54		49.55	120	8.93	109.02	122.98
Pré long	272.40	66.08	1.80		93.39	120	2.92	70.00	107.64
calameau	102.49	134.65	1.38		35.75	120	2.87	89.74	64.13
Anglais 1	591.24	47.02	2.78		48.00	120	12.32	191.40	139.80
Prise V	669.25	38.70	2.59		63.74	100	10.50	175.14	137.76
Anglais 2	608.98	58.13	3.54		44.89	120	13.57	165.60	139.74
Saules 1	563.01	46.18	2.60		78.74	90	7.15	89.10	133.87
Vigne I nord	222.46	60.91	1.36		12.22	90	4.98	119.16	95.79
Vigne II nord	182.57	115.30	2.11		19.38	90	5.95	91.58	69.63
Saules II	550.21	59.25	3.26		29.03	90	18.95	188.34	129.91
Anglais 2	608.98	58.13	3.54		42.74	90	14.25	130.42	135.84
Roubine	142.19	78.77	1.12		20.76	90	6.85	198.16	76.10
Figuiers	253.74	80.13	2.03		28.78	90	8.82	140.50	90.61
Aubargues	315.88	112.70	3.56		76.42	90	4.13	37.62	95.80
Prise VI	569.97	47.02	2.68		53.04	90	10.75	129.96	134.13

t_rapport4_emmah_dose_irr

Légende : Confrontation des doses mesurées et modélisées sur les domaines de Suffren et du Merle

Les données précédemment obtenues ont permis de valider le protocole de mesure. La seconde utilité de ces données a été de mettre en place une méthode d'estimation de la dose d'irrigation applicable à l'ensemble des parcelles de prairies irriguées de la plaine de la Crau en fonction de variables simples.

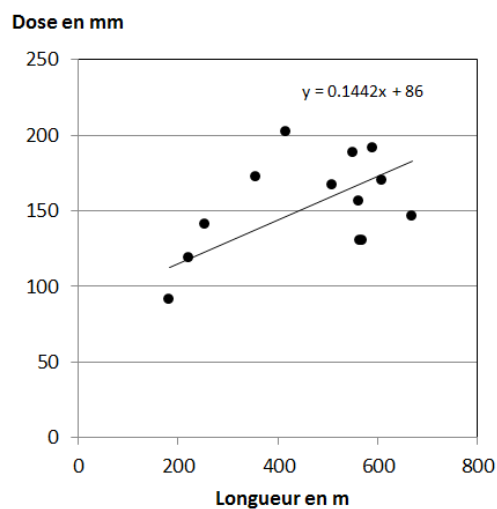
Une relation entre la longueur des parcelles et la dose d'irrigation peut être déduite de l'ensemble des données utilisées. La dose modélisée suit une relation linéaire avec la longueur des parcelles (figure f_rapport4_emmah_longueur_dose_irr).



f_rapport4_emmah_longueur_dose_irr

Légende : Variation des doses d'irrigation modélisées en fonction de la longueur des parcelles.

On observe le même type de relation toutefois moins évidente entre la longueur des parcelles et la dose mesurée. Cette relation exclue les parcelles reposant sur des sols hydromorphes montrant des doses d'irrigation bien plus faible, de l'ordre de 100mm (figure f_rapport4_emmah_longueur_dose_irr_mesure).



f_rapport4_emmah_longueur_dose_irr_mesure

Légende : Variation des doses d'irrigation mesurées en fonction de la longueur des parcelles.

Cette relation a été utilisée pour calculer la dose d'irrigation des parcelles de prairies sur l'ensemble de la plaine de la Crau :

$$Dose = 0.1442 \times longueur + 86$$

Pour les parcelles dont la longueur est supérieure à 450m, le calcul de la dose a été effectué sur la largeur de la parcelle plutôt que la longueur en utilisant la même équation.

Pour les parcelles de prairies reposant sur des sols hydromorphes, une dose unique de 100mm a été attribuée.

Enfin, le parcellaire pouvant présenter des anomalies et n'étant pas découpé en fonction des calans qui ne se distinguent que rarement sur les images satellites, la dose maximum apportée à une prairie irriguée a été fixée à 200mm.

3.2.2.3. Les dates de coupes

Les dates de coupes des prairies irriguées dépendent du décret définissant l'AOC du foin de Crau et sont présentées dans le tableau

t_rapport4_emmah_date_coupe_AOC :

	1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe
Date de début	01-mai	25-juin	15-août
Date de fin	31-mai	25-juil	30-sept

t_rapport4_emmah_date_coupe_AOC

Légende : Dates de coupe définies par le décret portant l'AOC du foin de Crau

Ces trois coupes sont exploitées pour produire le foin de Crau. Durant l'hiver, les prairies sont exploitées comme pâturages pour les brebis. On considère qu'il

existe deux coupes supplémentaires. La première a lieu mi-février, ce sont les brebis qui pâturent le foin avant la première pousse. La seconde à lieu entre octobre et décembre.

Interaction entre dates de coupe et précipitations

En premier lieu, les périodes de coupes sont définies en tenant compte des dates définies par le décret AOC. Dans un deuxième temps, les jours où aucune fauche n'est possible à cause des précipitations vont être identifiés.

Au sein des différentes périodes de coupes définies par l'AOC, on considère qu'il ne peut y avoir de fauches :

- le jour des précipitations,
- 1 jour avant les précipitations,
- lorsque plus de 3 jours de précipitations consécutifs ont lieu, aucune coupe n'est observée 3 jours avant les précipitations et un jour après la fin des précipitations.

Spatialisation des coupes

Pour l'ensemble de la plaine de la Crau, on considère que 16 jours sans précipitations sont nécessaires pour couper l'ensemble des prairies irriguées. Si moins de 16 jours sont disponibles lors de la première coupe, on considère qu'il y a un report de la date de fin des coupes au 15 juin, ce qui a notamment été observé pour l'année 2008.

En première coupe, les parcelles de prairies font l'objet d'un tirage aléatoire définissant un ordre de coupe. On considère qu'une surface équivalente de prairies irriguées est fauchée chaque jour.

Début des coupes et intervalle entre coupes

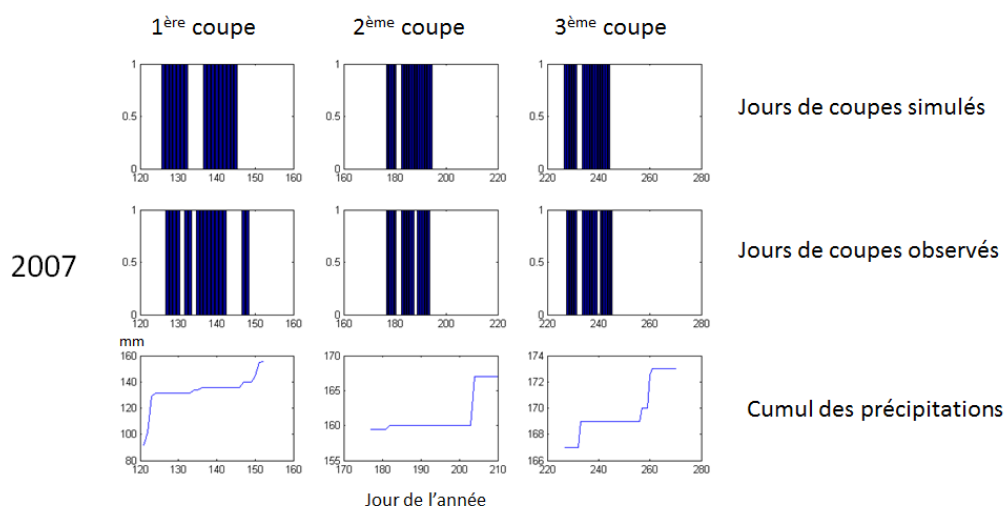
La date de la première coupe va dépendre des conditions météorologiques. Le cumul des températures au 1^{er} février est un facteur définissant le début des

coupes. Suivant les zones géographiques la valeur de ce cumul est variable. En fonction des données récupérées chez les exploitants agricoles sur les dates de coupes, on observe que la première coupe a lieu lorsqu'un cumul de 1000 degré.jour à partir du 1^{er} février est atteint.

Enfin on observe un intervalle régulier entre coupe sur chacune des prairies. Lorsque la première coupe a été repoussée par rapport à la date théorique de fauche qui ne rend pas compte des décalages dus aux précipitations, on observe que les exploitants ont tendance à resserrer la période entre les coupes. Ainsi :

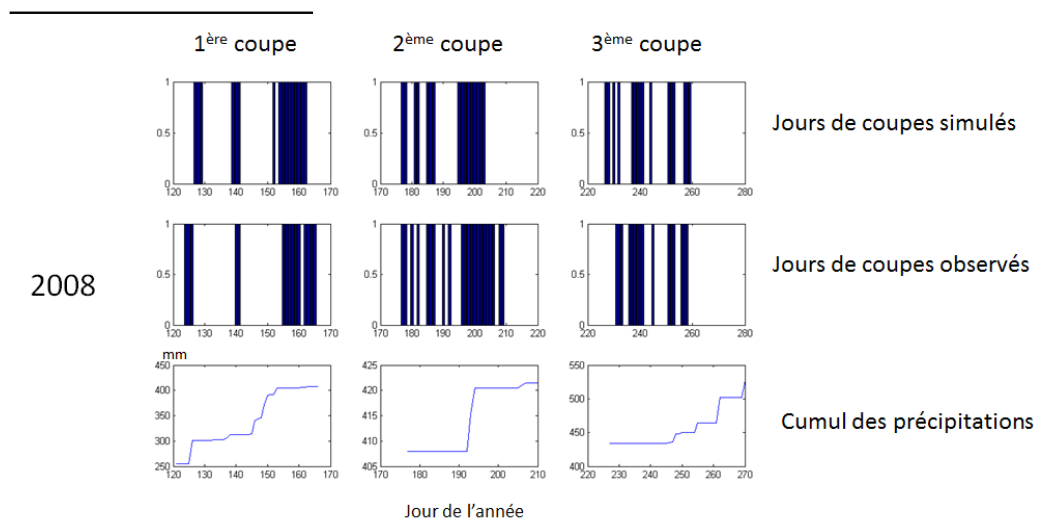
- le décalage observé en 1^{ère} coupe par rapport à la date théorique de coupe est réduit d'1/3 lors de la 2^{ème} coupe
- le décalage observé en 2^{ème} coupe par rapport à la date théorique de coupe est réduit d'1/3 lors de la 3^{ème} coupe.

Le résultat obtenu, confronté aux dates de coupes observées sur 3 exploitations est exposé dans les figures f_rapport4_emmah_date_coupe_2007 et f_rapport4_emmah_date_coupe_2008



f_rapport4_emmah_date_coupe_2007

Légende : Confrontation des dates de coupe simulées et observées sur 3 exploitations pour l'année 2007



f_rapport4_emmah_date_coupe_2008

Légende : Confrontation des dates de coupe simulées et observées sur 3 exploitations pour l'année 2007

- 1) Conclusions : synthèse des données agronomiques à constituer pour réaliser la simulation du fonctionnement des cultures :

Catégorie de données	Nom de fichier	Description
Parcellaire	parcellaire_crau_v5.shp	Parcellaire de l'ensemble de la Crau numérisé à partir du cadastre
Sol	carte_cassini_tot2.jpg	Carte de Cassini géoréférencée
	prairies_1783.shp	Numérisation des zones cultivées en 1873 à partir de la carte de Cassini
	landsat_1975_l93_crau	Image landsat du 03/10/1975
	prairies_1975.shp	Couche identifiant les prairies à partir de la classification de l'image landsat du 03/10/1975
	sols_stics_crau	Carte des sols utilisée pour les simulations STICS
	data/sol/param_crau.sol	Fichier STICS définissant les différents types de sol (Humidité, profondeur des horizons, taux d'éléments grossiers ...)
Irrigation	ASA_Crau_Chambre_agriculture_corr_RH_L93.shp	Limites des différentes associations syndicales d'arrosants
Plante	data/plt/prairie.plt	Fichier STICS contenant les paramètres écophysologiques des prairies
	data/plt/bledur.plt	Fichier STICS contenant les paramètres écophysologiques du blé
	data/plt/tournsol.plt	Fichier STICS contenant les paramètres écophysologiques du tournesol
Itinéraires techniques	data_in_type d'OS _année _nom de version	Fichiers d'entrée de multisimlib contenant l'ensemble des itinéraires techniques (fertilisation, dates de coupe, dates et doses d'irrigation)
	data/tec/prairie.tec	Fichiers contenant les itinéraires techniques de base des prairies
	data/tec/bledur.tec	Fichier contenant les itinéraires techniques de base des cultures de blé
	data/tec/tournsol.tec	Fichier contenant les itinéraires techniques de base des cultures de tournesol
Climat	data/climat/salon.année	Fichiers contenant l'ensemble des données météorologiques journalières
	data/climat/saf_numéro de maille .année	Données météorologiques journalières extraites des mailles SAFRAN

Bouteyre, G. and Duclos, G. (1994). Carte pédologique de France à 1/100000 : Arles. Editions, I. Olivet, INRA.

van Genuchten, M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil Sci. Soc. Am. J **44**(5): 892-898.

Wösten, J. H. M., Lilly, A., et al. (1999). "Development and use of a database of hydraulic properties of European soils." Geoderma **90**(3-4): 169-185.