EVOLUTION DE L'OCCUPATION-UTILISATION DU SOL EN CONTEXTE AGRICOLE INTENSIF : ESSAI DE SIMULATION DE LA COUVERTURE HIVERNALE DES SOLS DANS LE PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDALOUS (NORD-EST TUNISIE)

Hamouda SAMAALI, Mohamed Naceur OMRANE et Mohamed Chedly RABIA

Unité de recherche, Géomatiques & Géosystèmes (02/UR/10-01), Faculté des Lettres des Arts et des Humanités, Campus universitaire de la Manouba, 2010

samaalihamouda@yahoo.fr

Résumé :

L'objectif de cette étude est de développer une méthode reproductible qui permet d'effectuer une prédiction à court terme (5 ans) de la couverture hivernale des sols dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous (une idée inspirée des travaux de CORGNE S., 2004). En effet, ce type de couverture a un impact avéré sur la qualité de l'eau. Il influe sur le transfert des flux de polluants d'origine agricole au sein des périmètres irrigués. Sa prédiction, peut constituer une aide à la programmation d'actions dans le cadre de projets de restauration de la qualité de l'eau. En revanche, elle pose un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique (CORGNE S., 2004).

Une approche approximative qui se base sur un modèle expert et qui utilise *la règle des évidences de Dempster-Shafer* a été retenue puisqu'elle permet de prendre en compte l'imprécision et les lacunes de connaissances liées à cette problématique et aux données disponibles, et d'associer un degré de confiance aux résultats produits. Des prédictions de la couverture hivernale des sols sont effectuées selon les deux hypothèses « Sols couverts » et « sols nus à peu couverts ». Après avoir déterminé les dynamiques spatio-temporelles des changements passés, notamment à partir d'une série multi-temporelle d'images de télédétection, et avoir défini les facteurs motivants les changements passés et à venir, la fusion des sources d'informations qui représentent ces facteurs sera réalisée avec *la règle de Dempster-Shafer* (CORGNE S., 2004).

Introduction :

Dans des régions d'agriculture intensive telle que le delta de la Mejerda, la connaissance de l'évolution de l occupation-utilisation du sol représente un enjeu important. Des changements de systèmes culturaux, des modifications des structures paysagères et des pratiques agricoles ont entraîné depuis quelques décennies des problèmes environnementaux, en particulier une dégradation importante de la qualité des sols et des ressources en eau.

Depuis la fin des années "90", la mise en place de programmes de restauration a enclenché des modes d'usage des sols et des pratiques agricoles dont certains peuvent se traduire spatialement. Dans ce contexte, la connaissance des variations spatio-temporelles de l'occupation-utilisation du sol constitue un élément-clé dans une démarche de restauration de la qualité " eau-sol ". En particulier, les successions d'états de couverts

végétaux sur les parcelles en hiver influent sur les transferts de flux polluants et jouent comme un accélérateur lorsque les parcelles sont laissées nues après des cultures telles que le maïs ou les céréales, ou comme un frein lorsqu'elles sont couvertes par des inter-cultures. Ainsi, l'évolution de la localisation de la couverture végétale en hiver au sein des périmètres irrigués a un impact sur la qualité de l'eau en faisant notamment varier les taux de nitrates et de pesticides, la proportion de surfaces agricoles laissées nues constitue un des indicateurs retenus pour l'étude de l'évolution des systèmes de production agricole vis-à-vis de l'environnement (CORGNE S., 2004). La définition des trajectoires des changements de la couverture hivernale des sols présente ainsi un intérêt dans le cadre des programmes de restauration surtout pour la qualité de l'eau, tant à des fins de validation des actions entreprises pour les changements passés observés, qu'à des fins de programmation d'actions pour les changements à venir à travers l'établissement des scénarios prédictifs.

On a intérêt à simuler l'évolution de la couverture hivernale dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous pour trois raisons :

- Tout d'abord, les résultats de l'étude hydro-agricole de Kalaât Landalous-Ras Djebel (1998), montrent que dans ce secteur d'étude il y eu disparition de certaines cultures trop sensibles au sel et aux excédents azotés malgré que ce périmètre est récent (1992).
- Ensuite, on a constaté pendant la réalisation d'une enquête « socio-économique 2007» un changement rapide des systèmes culturaux non comparable au reste du delta, avec des attitudes culturales originaires aux Kaliaâs [1] ».
- Enfin, on dispose de plusieurs données relatives à ce secteur (images satellitaires, statistiques sur la production agricole, données du milieu physique…) et nécessaire au processus de modélisation.

1. Le choix d'un modèle pour simuler la couverture hivernale des sols en contexte agricole intensif :

1.1. Prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision dans le processus de modélisation :

La masse de plus en plus importante d'informations diverses et variées liée, entre autre, au fort développement de l'informatique (et donc des possibilités accrues de traiter et stocker l'information) génère de nouvelles perspectives en géographie (CORGNE S., 2004). Elle pose également de nouvelles difficultés de gestion et de traçabilité des contenus informationnels qui font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches et débats (organisation des bases de données, mise aux normes internationales des métadonnées, gestion et utilisation des « mémoires environnementales »…). Il est reconnu maintenant que les informations spatialisées (issues de la télédétection, SIG, contrôles terrain,…) sont rare, voire jamais totalement exactes (HEUVELINK GERARD B.M. et BURROUGH P.A., 2002). On trouvera toujours des divergences significatives entre la réalité et sa représentation, car la réalité est incorporée dans un type de format de donnée rigide où les propriétés des unités spatiales sont au mieux estimées.

[1] : Habitants originaires de Kalaât Landalous.

La validation d'un modèle de simulation de l'évolution de l'occupation-utilisation du sol est généralement basée sur la comparaison entre les résultats du modèle avec l'état observé à un instant précis. Un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique apparaît alors. En effet, il faut que la comparaison soit fiable, c'est-à-dire que la date de référence qui sert de validation correspond au même contenu informatif que le résultat issu de la simulation. Cela implique le même processus de classification si on utilise une donnée de télédétection, une résolution spatiale identique…Différents niveaux de validation interviennent : le premier prend en compte l'aspect quantitatif du taux de réussite de la validation. Le deuxième est qualitatif. Il valide spatialement la simulation avec le terrain (CORGNE S., 2004).

Dans le cadre précis de simulations à court terme de l'évolution de la couverture hivernale des sols, les informations recueillies pour produire les simulations sont à la fois imprécises et incertaines, soit qu'elles proviennent du traitement des séries d'images de télédétection, d'enquêtes et de relevés effectués sur le terrain, de statistiques agricoles ou encore d'avis d'experts. En conséquence, les simulations effectuées doivent prendre en compte le niveau d'imprécision et d'incertitude associé à la fois aux données et aux résultats produits. Cette dernière condition vise à augmenter la crédibilité des documents produits.

Le modèle doit par ailleurs être capable de gérer l'incertitude et l'imprécision, tout au long du processus de modélisation (CORGNE S., 2004). Le modèle de type expert, reposant sur la théorie des évidences de Dempster-Shafer apparaît dans ce cas le plus pertinent. A l'inverse des modèles généralement utilisés, la théorie des évidences introduit en effet de l'incertitude dans le processus de modélisation, permet l'expression de l'ignorance ou de l'imprécision dans le corpus de connaissances et montre que le niveau de confiance dans une hypothèse donnée n'est pas nécessairement le complément de sa négation (Eastman, 1997), laissant ainsi la place à l'incertitude et au doute.

1.2. La théorie des évidences de Dempster-Shafer :

La théorie des évidences de Dempster-Shafer, appelée également théorie du raisonnement plausible, est souvent considérée comme une généralisation de la théorie bayésienne des probabilités subjectives (DEZERT J, 2003). Développée pour la première fois par Dempster en 1968 et améliorée par Shafer en 1976, elle est basée sur un fondement mathématique robuste qui permet de représenter l'incertitude que l'on peut avoir sur une information ou un phénomène à traiter (CORGNE S., 2004). La théorie de Dempster-Shafer, que l'on nommera DST (Dempster Shafer Theory), est un outil théorique puissant qui permet de manipuler des informations entachées d'incertitudes et d'imprécisions et qui combine, via la règle de fusion définie par Dempster, différentes sources d'information en vue d'une prise de décision.

1.2.1. Notions fondamentales :

La théorie de Dempster-Shafer peut être analysée comme une extension de la règle de Bayes. La théorie probabiliste Bayesienne, permet de combiner une nouvelle évidence (une connaissance sur un phénomène ou processus quelconque) avec une connaissance définie "**a priori**" sur une hypothèse donnée, pour estimer la vraisemblance que cette hypothèse soit juste ou pas. Elle consiste ainsi à déterminer une règle de décision qui choisit l'hypothèse ayant la probabilité "**a posteriori**" maximale de se dérouler (BRACKER H., 1996).

$$p(h/e) = \frac{p(e/h).p(h)}{\sum_i p(e/h_i).p(h_i)}$$

- *p(h) :* La probabilité "**a priori"** de l'événement en question.
- *p(e/h) :* La probabilité conditionnelle d'une observation.

Le plus simple cas rencontré considère seulement deux hypothèses. La première question posée est de savoir s'il existe une connaissance "**a priori"** permettant d'attribuer une probabilité plus forte à l'une des deux hypothèses. Le cas échéant, une "**probabilité a priori"**, c'est-à-dire, une probabilité sans relation avec les évidences "**p(h)"** et permet d'établir que l'hypothèse est vraie, est affectée à une des deux hypothèses. Dans le cas contraire, c'est-à-dire s'il n'existe aucune hypothèse de probabilité supérieure aux autres, les hypothèses sont intégrées dans le processus de combinaison avec des valeurs égales. "La probabilité conditionnelle" **p (e/h)** exprime la vraisemblance que les évidences soutenant chaque hypothèse soient pertinentes. La probabilité "a posteriori" **p (h/e)** exprime quant à elle la probabilité que l'hypothèse soit vérifiée à partir des évidences prédéfinies (CORGNE S., 2004).

1.2.2. Le cadre de discernement :

La théorie des évidences décrit un « cadre de discernement » Θ ou ensemble d'« hypothèses » élémentaires envisageables pour la solution du problème posé (DEZERT J., 2003). Ce cadre intègre toutes les hypothèses (Θ_i) nécessaires à la description complète d'un problème posé :

$$(\Theta_i) = \left\{ \theta_1, \theta_2, \theta_3, \ldots\ldots\ldots \theta_N \right\}$$

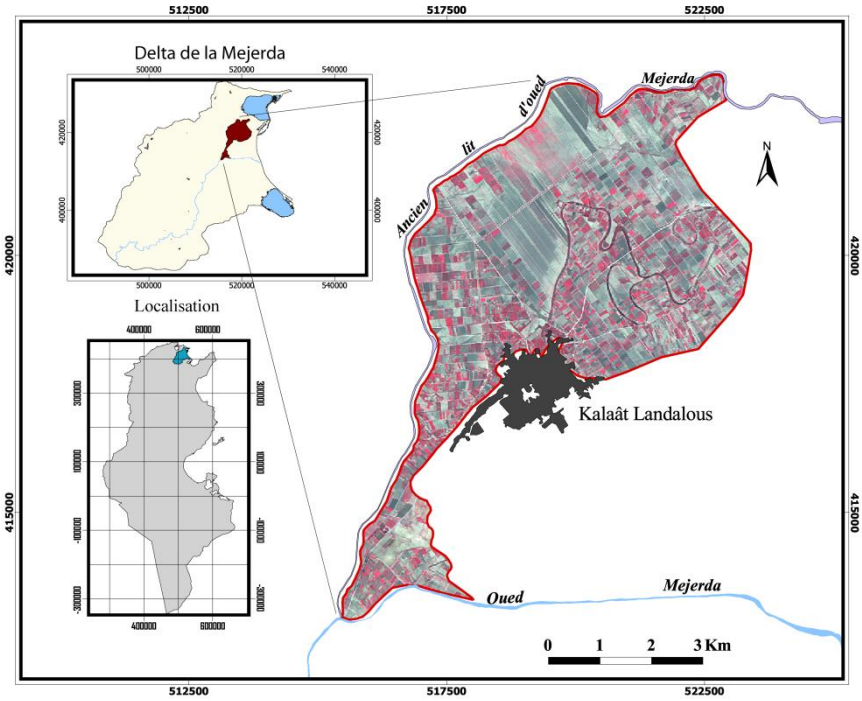
La théorie de Dempster-Shafer comprend trois types d'opérations :

- La définition des fonctions de masses, de crédibilité et de plausibilité.
- La fusion des informations par la règle de Dempster.
- La prise de décision.

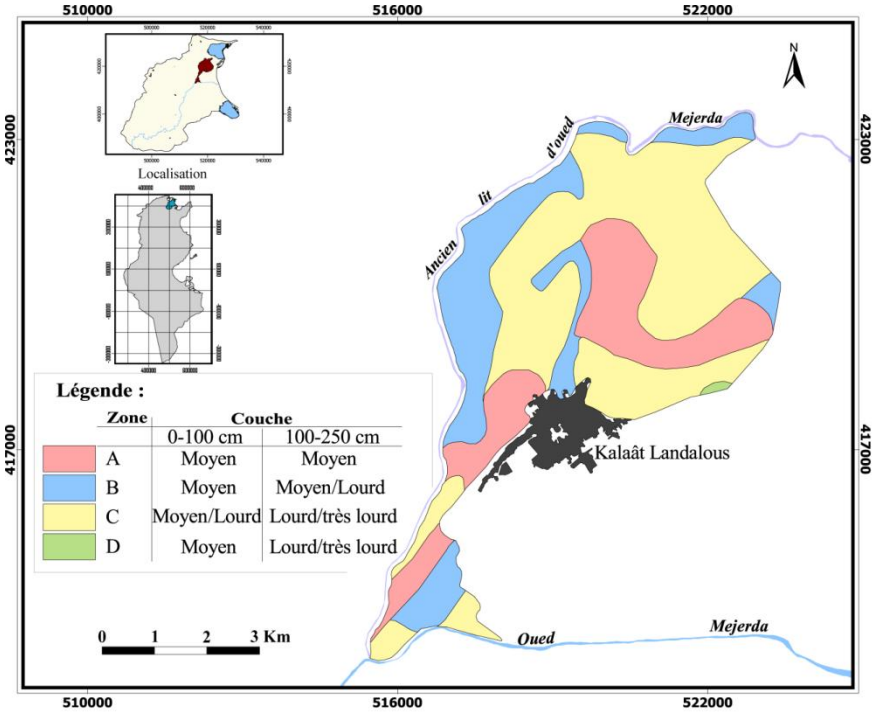
2. Les données du site :

La plaine de Kalaât Landalous est située dans la partie orientale du delta de la Mejerda (ill. n°1) à une altitude de 3 à 5 m. Elle couvre une superficie de 3060 ha (3191 ha y compris les zones d'habitas, les routes et les différents aménagements hydrauliques) dont une partie gagnée sur des zones marécageuses et saumâtres de l'embouchure de l'oued Mejerda.

Caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride supérieur à hiver doux, la plaine de Kalaât Landalous reçoit près de 470 mm de pluie par an et son déficit hydrique climatique annuel s'élève à plus de 900 mm (HACHICHA M. et al., 1997). Les sols sont peu évolués d'apport fluviatile, formés de matériaux argilo-limoneux fins à dominance de montmorillonite déposés par la Mejerda. On distingue des sols alluviaux sains et des sols avec des caractéristiques de salinité et de sodicité. Quatre unités texturales peuvent être distinguées à travers la carte des textures au 1/50000 (secteur de Kalaât Landalous,) (ill. n°2).



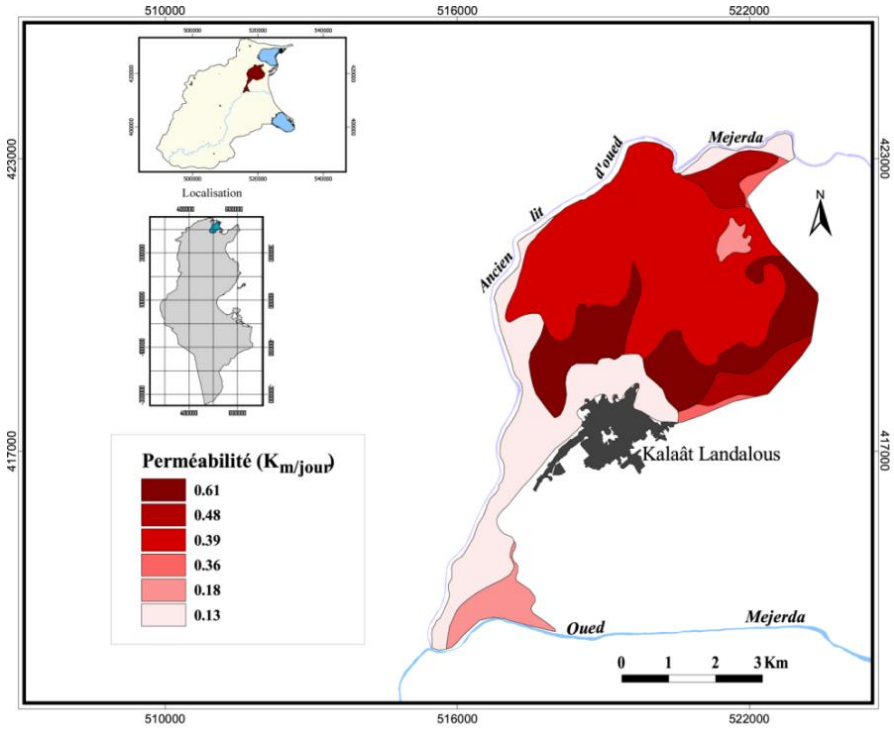
ill. n°1 : Le périmètre public irrigué de Kalaât Landalous : Localisation et délimitation (image Spot/XS 2002, ISIS-CNES)



ill. n°2 : Les unités texturales de la plaine de Kalaât Landalous
(Carte des textures au 1/50000, secteur de Kalaât Landalous)

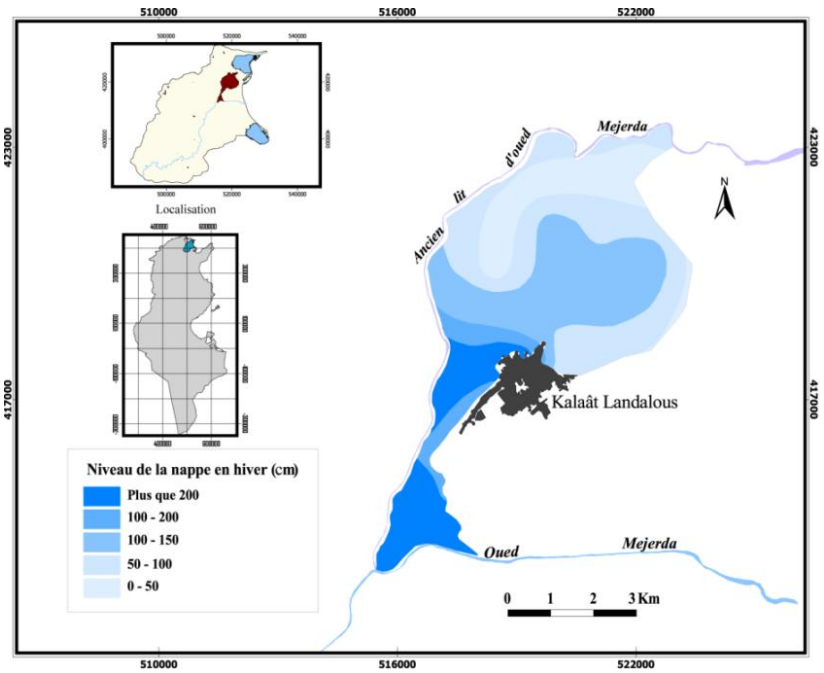
Du point de vue perméabilité, on peut dire que les mesures effectuées par le service de la Pédologie et de l'Hydrologie (ministère de l'agriculture) au début des années "1980" ont permis de déterminer six zones de mêmes perméabilités. Il est à remarquer que les sols situés à proximité de l'ancien lit d'oued Mejerda, ont une perméabilité relativement faible (ill. n°3). Ceci étant vraisemblablement dû à des apports de limons et d'argiles lors des crues

de Mejerda. Sur le reste de la plaine, on remarque une dégradation croissante de la perméabilité. Ceci est dû à l'halomorphie (CADIC B. & CLOAREC J-C., 1976).



ill. n°3 : La perméabilité des sols de la plaine de Kalaât Landalous (CRDA de l'Ariana, 2009)

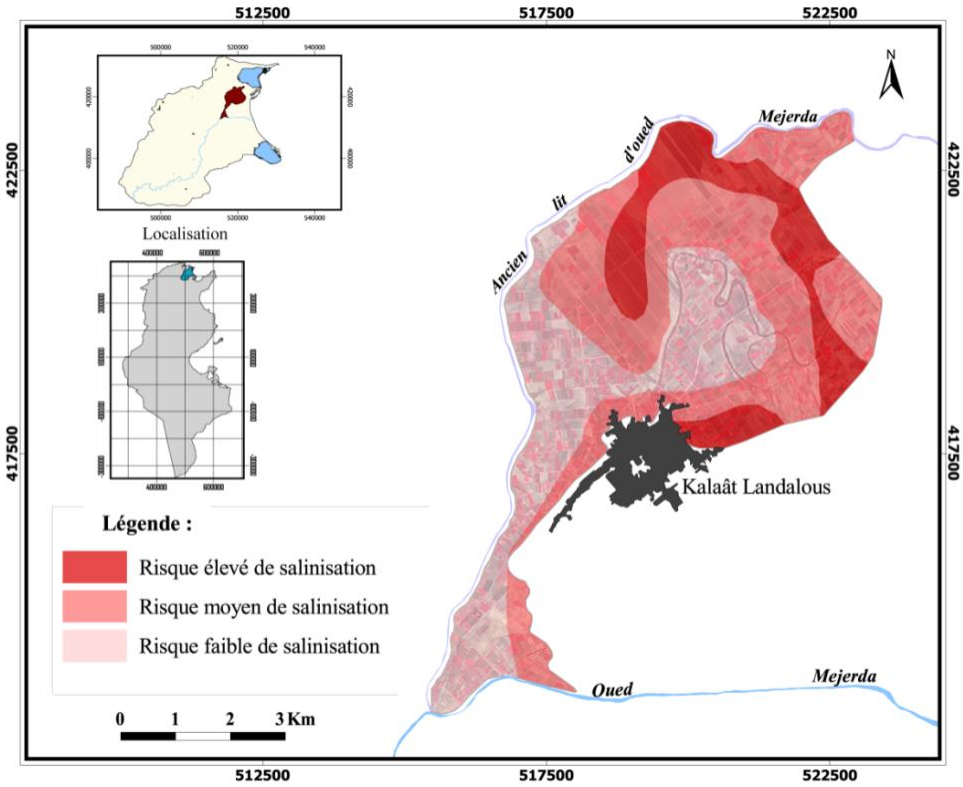
L'illustration des niveaux de la nappe de Kalaât Landalous (ill. n°4) pour les hivers de la période 1990-2002, montre que dans la partie Nord de la plaine (intéressante du point de vue agricole), la nappe remonte jusqu'à près de 50 cm en hiver. A l'Est du périmètre, Il est possible de tracer une ligne parallèle au rivage où la nappe se trouve à moins de 1 m.



ill. n°4 : Situation de la nappe de Kalaât Landalous en hiver (1990-2002)
(CRDA de l'Ariana, 2009)

Sur la base des propriétés des sols (texture et salinité) et les caractéristiques de la nappe (niveau et salinité) et leur variabilité spatio-temporelle, HACHICHA M. et al. (1997), on a pu distinguer trois zones à risques de salinisation (ill. n°5) :

- Au milieu de périmètre et près des bras morts des oueds, il existe une zone à faible risque de salinité. Elle est caractérisée par un sol peu perméable et faiblement salin (teneur en sel < 4dS/m (ce qui correspond à 3 g/l environ)). La nappe est à plus de 200 cm avec une salinité inférieure à 15 dS/m .
- Tout autour de la première, il existe une zone à risque de salinisation moyenne : le sol est peu perméable et sa salinité est moyenne (4dS/m < teneur en sel < 8 dS/m). La piézométrie de la nappe varie entre 100 cm et 200 cm, avec une salinité comprise entre 10 dS/m et 20 dS/m.
- Au Nord-Est, au Sud et à l'Est, des zones sont à risques de salinisation élevée. Le sol y est stratifié et très peu perméable (salin et sodique). La nappe varie entre 60 cm et 120 cm et sa salinité est comprise entre 10 dS/m et 30 dS/m (HACHICHA M. et al., 1997).

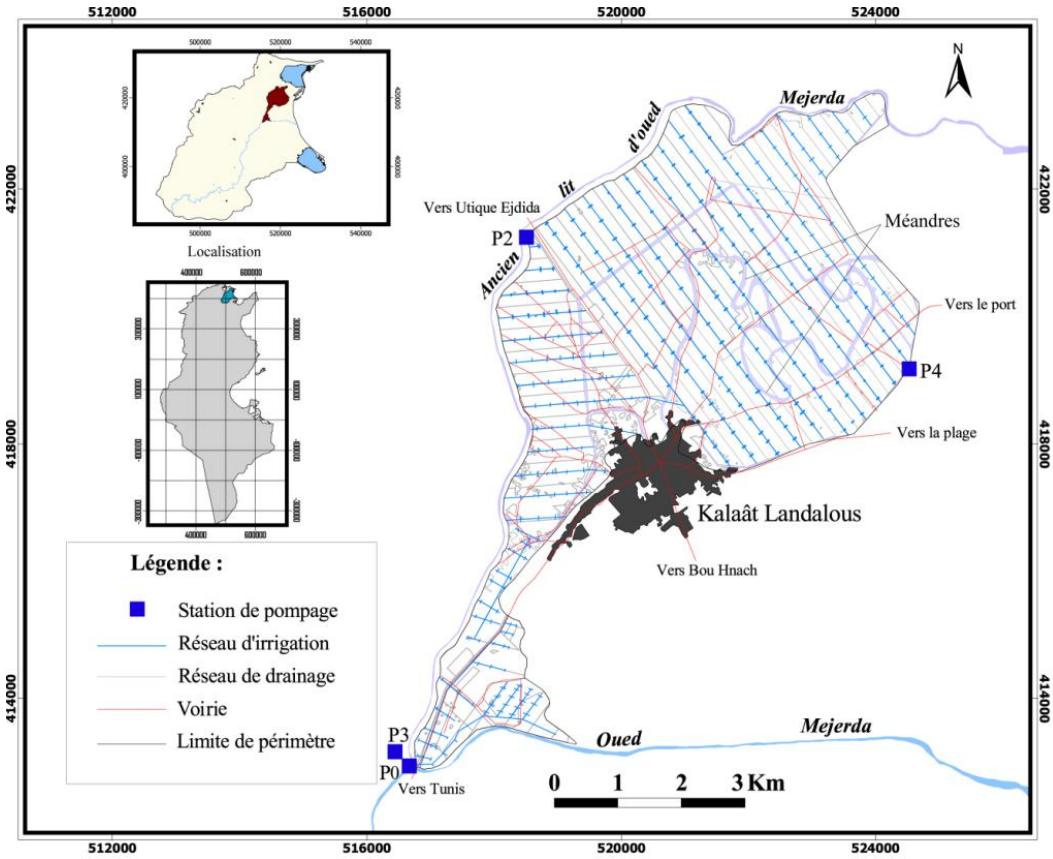


ill. n°5 : Les zones à risque de salinisation dans la plaine de Kalaât Landalous (HACHICHA M. et al., 1997 : document modifié), (image de fond : Spot/XS 2002, ISIS-CNES)

L'aménagement hydro-agricole du périmètre entrepris en 1986 (achevé en 1992), a consisté en l'installation d'un réseau de drainage qui comprend des drains tertiaires enterrés, des canaux secondaires à ciel ouvert, deux émissaires principaux et une station de pompage qui refoulent les eaux de drainage vers la mer. Pour son irrigation par aspersion, le périmètre a été divisé en unités parcellaires de 5 ha desservies par des bornes d'irrigation à partir d'une station de relevage des eaux de la Mejerda (ill. n°6). L'eau est pompée de la station

"P0" qui envoie l'eau au bassin de Zhana et au barrage de Kharba fournissant ainsi la charge nécessaire pour l'irrigation par aspersion ou au goutte-à-goutte.

Pour alimenter le périmètre, l'eau transite par une station "P2" (ill. n°6); les cultures maraîchères et fourragères sont préconisées pour valoriser ces terres et rentabiliser les équipements (SLAMA F. et al., 2004).



ill. n° 6 : Les différents aménagements hydrauliques dans les périmètres irrigués de Kalaât Landalous (CRDA de l'Ariana, 2009)

3. Application de la théorie des évidences pour la modélisation de la couverture hivernale des sols sur le périmètre irrigué de Kalaât Landalous :

3.1. Les données utilisées et la méthodologie adoptée pour le processus de modélisation :

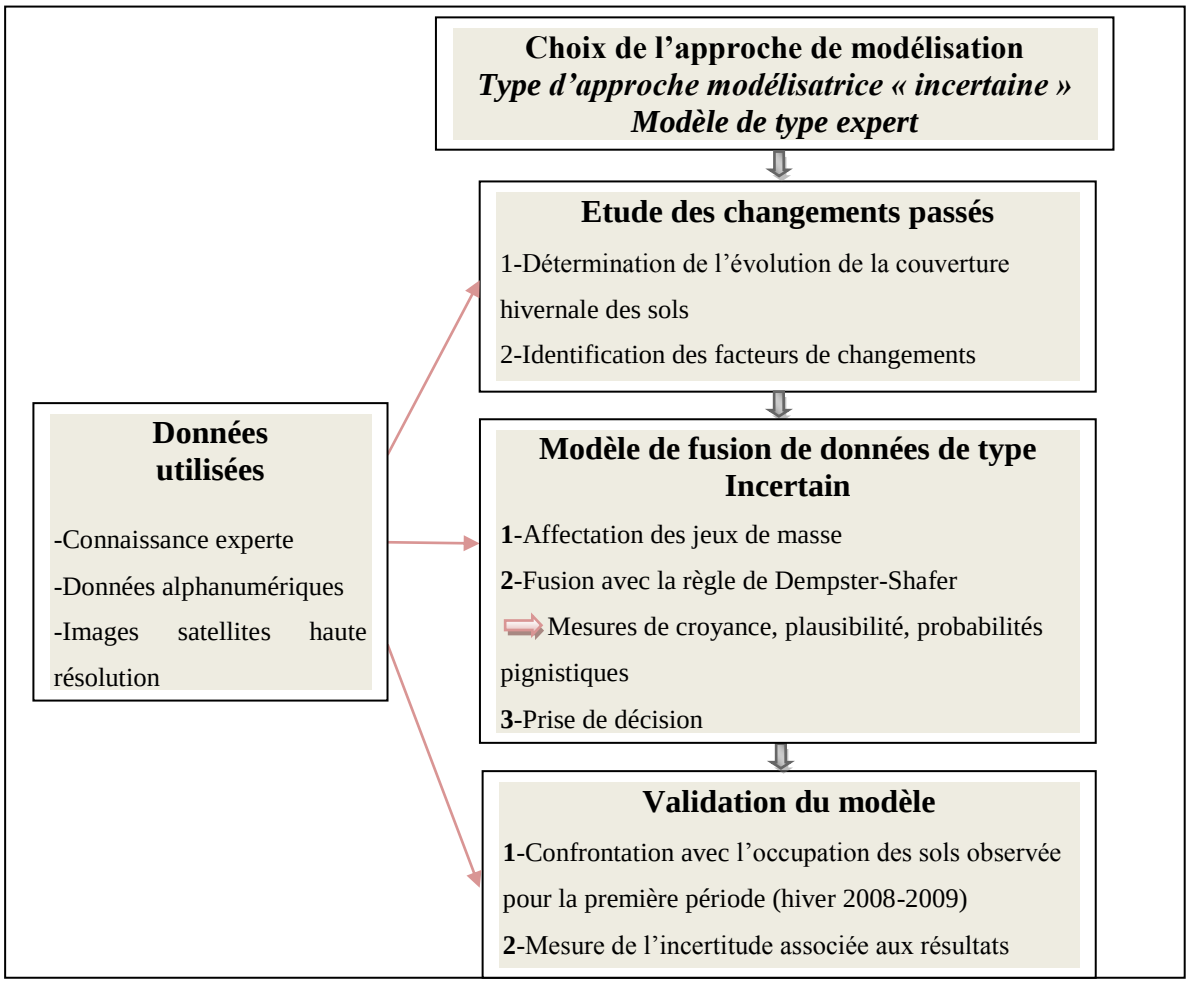
3.1.1. Les données utilisées :

Les données utilisées dans le cadre de ce travail sont très variées. Elles comprennent une série d'images de télédétection, des données vectorielles sur les limites administratives, les structures paysagères, les activités socioéconomiques, ainsi que des données issues de l'enquête socio-économique effectuées sur le terrain et auprès des exploitations agricoles. Notons qu'une bonne partie des données vectorielles proviennent de CRDA de l'Ariana (Tableau n°1), L'ensemble de ces données est traité sous SIG.

Tableau n°1 : Données utilisées dans le cadre du processus de modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sur le périmètre irrigué de Kalaât Landalous

Données de type spatial	
Limite du PPI	Couche vectorielle dérivée du plan détaillé du PPI (CRDA, Ariana)
Limites parcellaires	Couches vectorielles digitalisées à partir du plan du PPI et remises régulièrement à partir d'images satellitaires
Données de milieu (salinité, profondeur des nappes…)	Couches vectorielles digitalisés à partir des données cartographiques fournies par les services de CRDA de l'Ariana
Occupation/Utilisation du sol 1999	Couche vectorielle - Projet INFOTEL (DGF-MARH)
Images satellitaires	Une image Spot/XS (décembre 1999) avec une résolution de 20 m (ISIS-CNES)
	Une image Spot/XS (décembre 2000) avec une résolution de 20 m (CNT-Tunis)
	Une image Spot/XS (décembre 2001) avec une résolution de 20 m (CNT-Tunis)
	Une image Spot/XS (décembre 2002) avec une résolution de 20 m (UR-Géomatique & Géosystèmes)
Données de type socio-économique	
Système de production agricole	Défini par exploitation et associé au parcellaire agricole (C.T.V. - Kalaât Landalous)
Type d'exploitation (2007)	Défini par exploitation et associé au parcellaire agricole (C.T.V. - Kalaât Landalous)

3.1.2. La méthodologie adoptée pour le processus de modélisation :



ill. n°7 : Méthodologie du processus de modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols appliquée sur le périmètre irrigué de Kalaât Landalous (inspirée des travaux de CORGNE S., 2004).

Toute modélisation prédictive de l'évolution de l'occupation-utilisation du sol requiert d'une part la connaissance des trajectoires spatio-temporelles passées de l'occupation des sols, l'identification des facteurs qui ont motivé ces changements ainsi que la détermination de leur poids relatif, et enfin des connaissances expertes permettant d'émettre des hypothèses vraisemblables sur le devenir des territoires étudiés en fonction de paramètres socio-économiques, législatifs, climatiques…(CORGNE S., 2004).

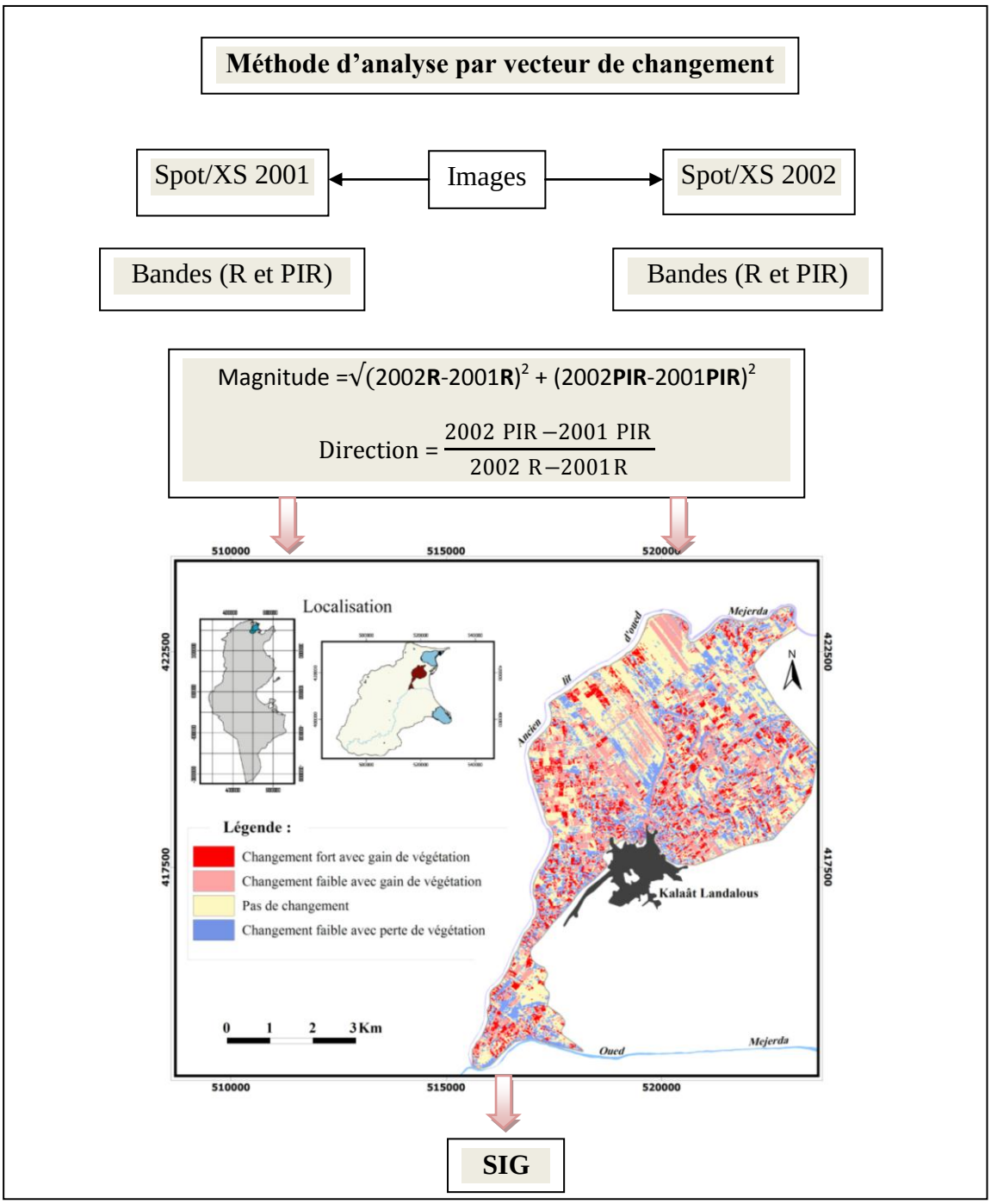
Les étapes de la modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sont donc structurées selon ce cheminement (ill. n°7). Les changements passés sont d'abord déterminés essentiellement à partir d'une série multi-temporelle d'images satellitaires et à partir des systèmes de productions utilisés, puis par les facteurs les plus significatifs dans les changements d'occupation-utilisation du sol observés. La dernière étape consiste à intégrer les sources d'informations décrivant les facteurs susceptibles, de contribuer à l'évolution des modes d'occupation hivernaux des sols dans le modèle de Dempster-Shafer, afin de produire une prédiction à court terme – pour l'hiver suivant – de l'occupation des parcelles agricoles du périmètre irrigué de Kalaât Landalous. L'incertitude liée à l'état incomplet et imprécis des connaissances et des données, tant pour produire l'historique des changements passés, que pour déterminer et quantifier les facteurs de ces changements passés et à venir, est prise en compte au niveau de l'affectation des jeux de masse aux sources d'information intégrées dans le modèle.

3.2. Détermination des changements de la couverture hivernale des sols à travers les images satellitales :

La télédétection est couramment utilisée pour déterminer l'occupation des sols, mais assez peu d'études portent exclusivement sur la couverture hivernale des sols. Un des principaux freins à l'utilisation de ces données réside dans la faible répétition d'acquisition d'images exploitables à cette saison en raison de la fréquence de la couverture nuageuse, et dans la résolution spatiale des capteurs les plus couramment utilisés en télédétection, en moyenne de l'ordre de 20 m, qui limite, dans certains cas, fortement la précision des résultats (HUBERT-MOY L. et al., 2001).

De nombreux travaux de recherches concernant la détection des changements actuels des surfaces terrestres à partir de données de télédétection ont été effectués depuis une vingtaine d'années (VOGELMANN, 1988; ALWASHE et BOKHARI, 1993; COPPIN et BAUER, 1996; RIDD et LIU, 1998 ; FOODY et BOYD, 1999 in HOUET T., 2006). Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de détection du changement qui soit réellement générique. Les résultats obtenus montrent des différences qui peuvent être significatives tant au niveau quantitatif qu'au niveau qualitatif (CORGNE S., 2004).

Dans le cadre de ce travail, une analyse exploitant les caractéristiques spectrales des images dénommées « change vector analysis » (analyse par vecteur de changement), proposée par Malila en 1980 a été appliquée (est privilégiée à une analyse classique de croisement de classification - première partie, pp.87-88). La méthode des vecteurs de changement est une méthode basée sur la comparaison des mesures radiométriques de différents canaux ou d'indices de végétation pour analyser les mutations de l'occupation du sol. La mesure des changements radiométriques se fait par la soustraction normalisée de deux canaux de deux dates différentes sur le même espace géographique (ill. n°8). Cette opération permet de dégager deux composantes de changement radiométrique :



ill. n°8 : Méthodologie de l'analyse des vecteurs de changements (AVC) calculés entre deux hivers.

- La magnitude du changement (Mc) est obtenue par la distance euclidienne entre les deux mesures radiométriques. Elle représente l'intensité du changement et quantifie les variations saisonnières ou annuelles des réponses spectrales ou de l'indice de végétation (HOUET T., 2006).

- La direction du changement, exprimée par l'angle issu des valeurs radiométriques (LAMBIN E.F. & STRAHLER A.H., 1994) indique s'il y à eu une perte ou un gain de végétation entre les deux dates étudiées.

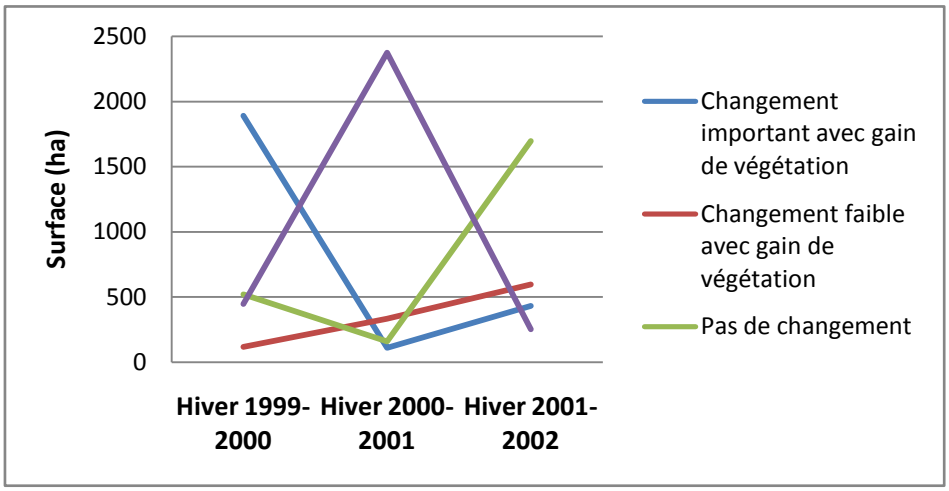
L'intersection et le seuillage de ces deux indicateurs permet de qualifier le changement (gain, perte ou stagnation de la végétation entre deux dates) et de le quantifier (fort, faible ou nul).

A titre d'exemple, l'analyse des vecteurs calculés pour les hivers 2001/2002 et 2002/2003 (Tableau n°2) permet de noter que les changements d'occupation du sol entre les deux hivers sont importants spatialement ; environ 1278 ha soit 42,9 % du périmètre irrigué de Kalaât Landalous y sont concernés par des changements. Parmi ces changements, 1026 ha ont connu des gains de végétation. 252 ha ont connu des pertes qui sont le résultat d'une modification radicale de l'utilisation du sol et concernent des parcelles en sols couverts durant l'hiver 2001/2002 qui ont évolué en sols nus à très peu couverts en 2002/2003.

Tableau n°2 : Estimation des modifications de couverture des sols entre les hivers 2001/2002 et 2002/2003 par l'analyse des vecteurs de changements

Classes	Surface (ha)
Changement fort avec gain de végétation	431
Changement faible avec gain de végétation	595
Pas de changement	1697
Changement faible avec perte de végétation	252

L'analyse menée entre chaque hiver étudié de 1999 à 2002 (ill. n°9) montre que les changements d'occupation de couverture hivernale des sols sont nombreux et que leur intensité entre les hivers peut s'avérer très hétérogène. En effet, près de 1046 ha sont caractérisés par "des changements faibles avec gain de végétation". Cela s'explique principalement par les dates d'acquisition des images satellites qui détectent des types de végétation à différents stades phénologiques. Les classes "changement important avec gain de végétation" et "changement faible avec perte de végétation" sont également très variables au fil des hivers qui illustrent une forte dynamique locale des changements (ill. n°9).



ill. n°9 : Evolution des niveaux de changement de couverture des sols entre les hivers étudiés (1999-2002).

3.3. Les facteurs de changement :

Les changements d'occupation-utilisation du sol sont souvent modélisés en fonction d'une sélection de variables socio-économiques et biophysiques que l'on nomme « facteurs

de changements » (OJIMA D. & MORANE E., 2004). Ces variables sont multiples. Elles peuvent ainsi correspondre à des contraintes climatiques, à la qualité des sols, aux programmes environnementaux agissant sur le site d'étude et à la conjoncture politique, économique,…Ainsi, il est impossible de prendre en compte la totalité des facteurs qui motivent les changements d'occupation-utilisation du sol.

Les recherches qui concernent ce thème peuvent profiter de l'effort de réflexion conceptuelle approfondie. Ils sont effectués depuis 1996 dans le cadre du programme LUCC (Land Use and Covert Changes) afin de désigner les facteurs motivants les changements d'utilisations des sols. En effet, des agronomes (dans le cadre du projet LUCC) ont réussi à définir par système de production, les facteurs prépondérants expliquant les dynamiques d'évolution de la couverture hivernale du sol tels que :

- La proximité de la parcelle par rapport au siège d'exploitation.
- La taille des parcelles.
- Le cycle de vie de chaque type de production.
- Mesures agro-environnementales (BIO).

A ce niveau, le facteur "mesures agro-environnementales (BIO)" est abandonnés car les données relatives à ce facteur sont trop incomplètes, même, elles ne sont plus renseignées par les organismes agricoles. A partir de la base de données constituée par les changements observés, l'identification des facteurs déterminant les changements de couverture des sols peut être enclenchée. En effet, l'utilisation des sols est largement dépendante des données du milieu physique (pédologie, salinité….) et de la façon de l'exploitation des ressources terrestres (systèmes de production – rotation agricole). Il est donc nécessaire de comprendre comment les acteurs sur le terrain sont amenés à prendre des décisions et de quelle manière les facteurs qui motivent les changements interagissent dans certains contextes et influent sur la décision de changer ou non l'usage des terres (HOUET T., 2006).

Au niveau parcellaire, le suivi des cycles de successions culturales représente un principal facteur explicatif des changements observés. Les différents systèmes de production répertoriés sont à prendre en compte et à mettre en relation avec des itinéraires techniques et des types de rotations culturales. A Kalaât Landalous, deux systèmes de production dominants peuvent être identifiés et rattachés à des rotations « type » (tableaux n°3 et 4) :

Tableau n°3 : Calendrier agricole pour une succession culturale de type "étendu" sur deux ans

<table>
<tr><th></th><th>Oct.</th><th>Nov.</th><th>Déc.</th><th>Jan.</th><th>Fév.</th><th>Mar.</th><th>Avr.</th><th>Mai.</th><th>Juin</th><th>Juil.</th><th>Aou.</th><th>Sep.</th></tr>
<tr><td>Année1</td><td>Sol nu à peu couvert</td><td colspan="3">Semis céréales</td><td colspan="4">Croissance des céréales</td><td colspan="2">Récolte des céréales</td><td colspan="2">Pâturage</td></tr>
<tr><td>Année2</td><td>Pâturage</td><td>Semis fève</td><td colspan="5">Croissance de fève</td><td>Récolte de fève</td><td colspan="3">Sol nu a peu couvert</td></tr>
</table>

Source : C.T.V., Kalaât Landalous, 2009

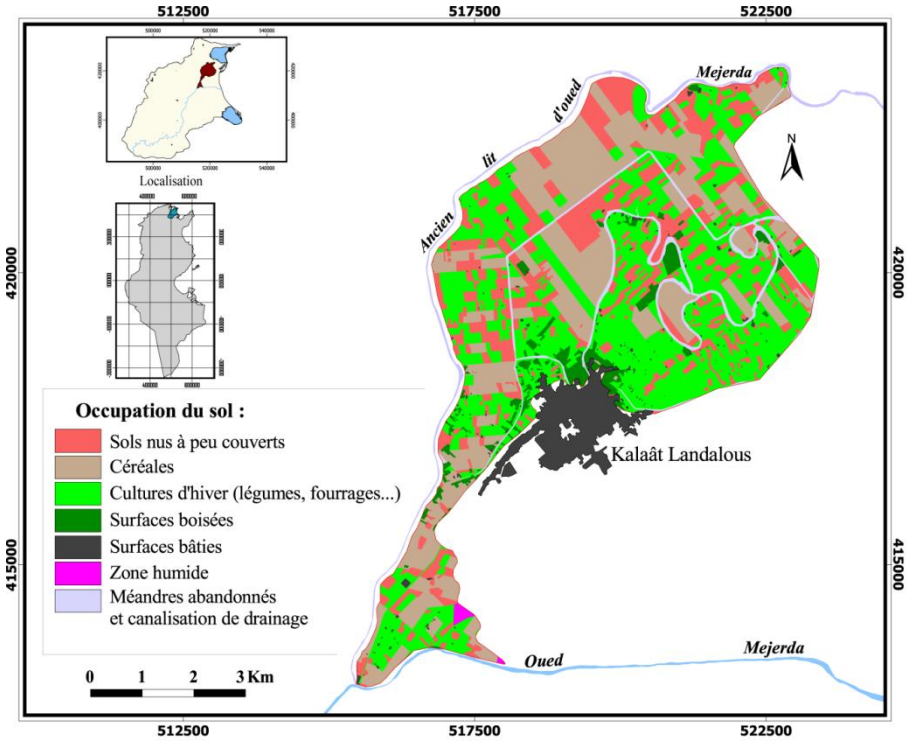
Tableau n°4: Calendrier agricole pour une succession culturale de type "diversifié" sur trois ans

	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin	Juil.	Aou.	Sep.
Année1	Sol nu à peu couvert	Semis céréales		Croissance des céréales					Récolte des céréales		Pâturage	
Année2	Semis des fourrages secs			Croissance des fourrages secs d'hiver + (légumes d'hiver)			Récolte des fourrages secs d'hiver		Fourrages d'été			Sol nu a peu couvert
Année3	Sol nu à peu couvert						Légumes d'été *et/ou* courge *et/ou* Melon				Sol nu à peu couvert	

Source : C.T.V., Kalaât Landalous, 2009

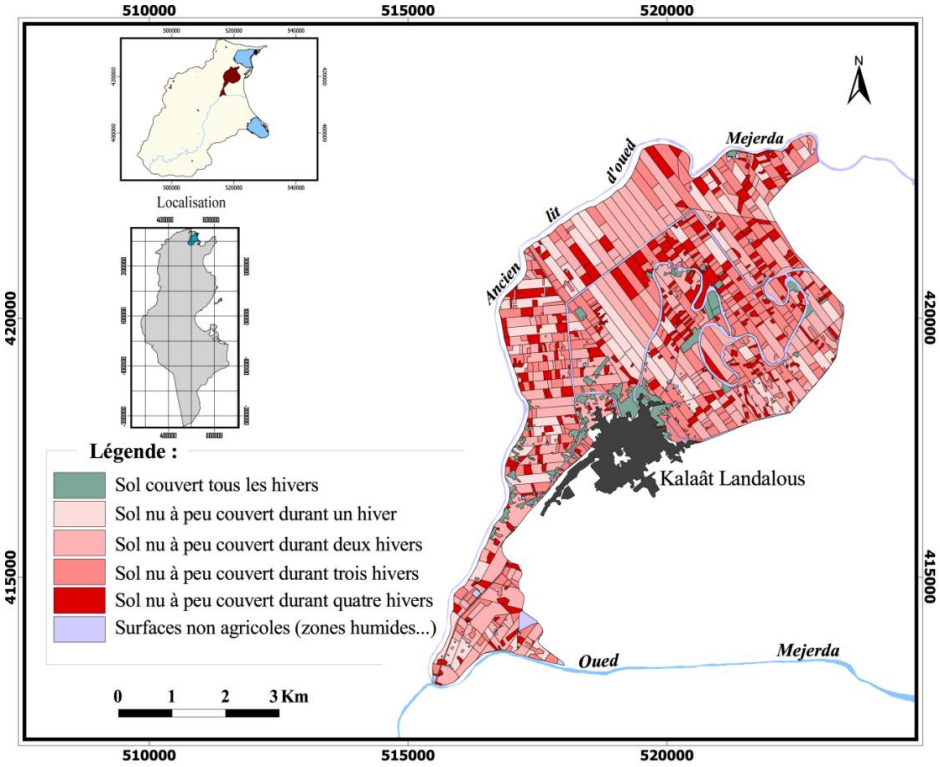
Les données statistiques fournies par le C.T.V. de Kalaât Landalous et qui concernent l'état de recouvrement du sol, le taux d'utilisation et le taux d'intensification des sols dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous depuis 1992 sont utiles également au processus de modélisation. D'ailleurs, elles sont intégrées dans la base de données "SIG".

Les travaux de CORGNE S. (2004) et de HOUET T. (2006 & 2008) ont dénoté que l'analyse du rapport entre la variable «occurrence des sols nus à peu couverts » et celle « sol couvert » constitue un facteur de changement de la couverture hivernal pertinent. En effet, les occurrences de sols nus à peu couverts sont fortement corrélées aux dynamiques inter-hivernales des parcelles.



ill. n°10 : Occupation du sol hiver 2007-2008 (C.T.V. de Kalaât Landalous 2008, extraits d'images Google Earth © et enquête 2007)

Le croisement des vecteurs de changement des hivers étudiés (1999-2002), ainsi que la carte de l'occupation du sol pour l'hiver 2007-2008 (ill. n°10) avec celle des occurrences (ill. n°11) montrent que, 280 parcelles (soit 29.7%) ont été caractérisées par un "sol nu à peu couvert durant quatre hivers" (tableau n°5), et 346 parcelles (soit 36.7%) ont été caractérisées par un "sol nu à peu couvert durant trois hivers". Ces deux classes ont une occurrence forte, donc les changements sont faibles. Par contre, les parcelles qui ont été caractérisées par un "un sol nu à peu couvert durant deux hivers" (soit 18.8 %) et par un sol nu à peu couvert durant un hiver" (5.9 %), ont une occurrence faible et ont connu des changements importants (Tableau n°5).



ill. n°11 : Occurrence des "sols nus à peu couverts" pour les hivers étudiés (1999-2002 et 2007-2008) dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous.

Les facteurs déterminés par les experts (agronomes), ont fait l'objet d'une validation réalisée par confrontation avec les changements passés, observés et dérivés des images de télédétection et de l'occupation du sol pour l'hiver 2007-2008.

L'analyse de la relation entre le pourcentage des sols nus en hiver et les classes ou les seuils retenus pour la variable explicative « occurrence sols nus » (tableau n°5) montre que, globalement, plus les occurrences sont importantes, plus la probabilité de retrouver un « sol nu à peu couvert » pour l'hiver" est forte. La taille de parcelle et sa proximité par rapport au siège de l'exploitation influent également sur la présence des sols nus hivernaux, puisque les parcelles inférieures à 2 ha qui se trouvent à moins de 500 m du siège de l'exploitation sont majoritairement (71%) couvertes par la végétation au cours des hivers étudiés.

Ainsi, pour modéliser l'évolution de la couverture des sols du périmètre irrigué de Kalaât Landalous, on a retenu les facteurs suivants : « occurrence de sols nus à peu

couverts », « la taille des parcelles », « la proximité du parcellaire par rapport au siège d'exploitation » et « les successions culturales ou systèmes de production dominés ».

Tableau n°5 : Répartition des parcelles agricoles du PPI de Kalaât Landalous en fonction des classes ou des seuils retenus pour les variables explicatives des changements.

Variables explicatives des changements	**Classes ou seuils retenus**	**Effectifs (nombre de parcelles et %)**
Proximité de la parcelle par rapport au siège de l'exploitation	1 : parcelle < 500 m du siège d'exploitation	154 (64,7 %)
	2 : parcelle > 500 m du siège d'exploitation	84 (35,3 %)
	3 : Exploitation sans siège	522
Taille des parcelles	1 : parcelle > 2 ha	421(48,9 %)
	2 : parcelle < 2 ha	439 (51,1 %)
Occurrences des sols nus à peu couverts (de 1999 à 2002 et l'hiver 2007-2008)	1 : sol couvert tous les hivers	84 (8.9 %)
	2 : sol nu à peu couvert durant un hiver	56 (5.9 %)
	3 : sol nu à peu couvert durant deux hivers	178 (18.8 %)
	4 : sol nu à peu couvert durant trois hivers	346 (36.7%)
	5 : sol nu à peu couvert durant quatre hivers	280 (29.7 %)

3. 4. Application de la théorie des évidences pour la modélisation de la couverture hivernale des sols sur le périmètre irrigué de Kalaât Landalous :

3.4.1. Affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse et fusion des données :

La modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols est réalisée au début pour l'hiver 2008/2009, informée des données issues des images satellitaires, mais surtout de l'état de recouvrement du sol pour l'hiver 2007-2008 (ill. n°10).

Le « cadre de discernement Θ» correspond à l'hypothèse « sols nu à peu couverts » et à l'hypothèse « sols couverts » et l'union de ces deux hypothèse qui représente l'incertitude. Chaque source d'évidence (facteur de changement), reçoit une fonction de masse pour les deux hypothèses et leur union. Le résultat des affectations des jeux de masse est exprimé dans le tableau suivant :

Tableau n°6 : Affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse.

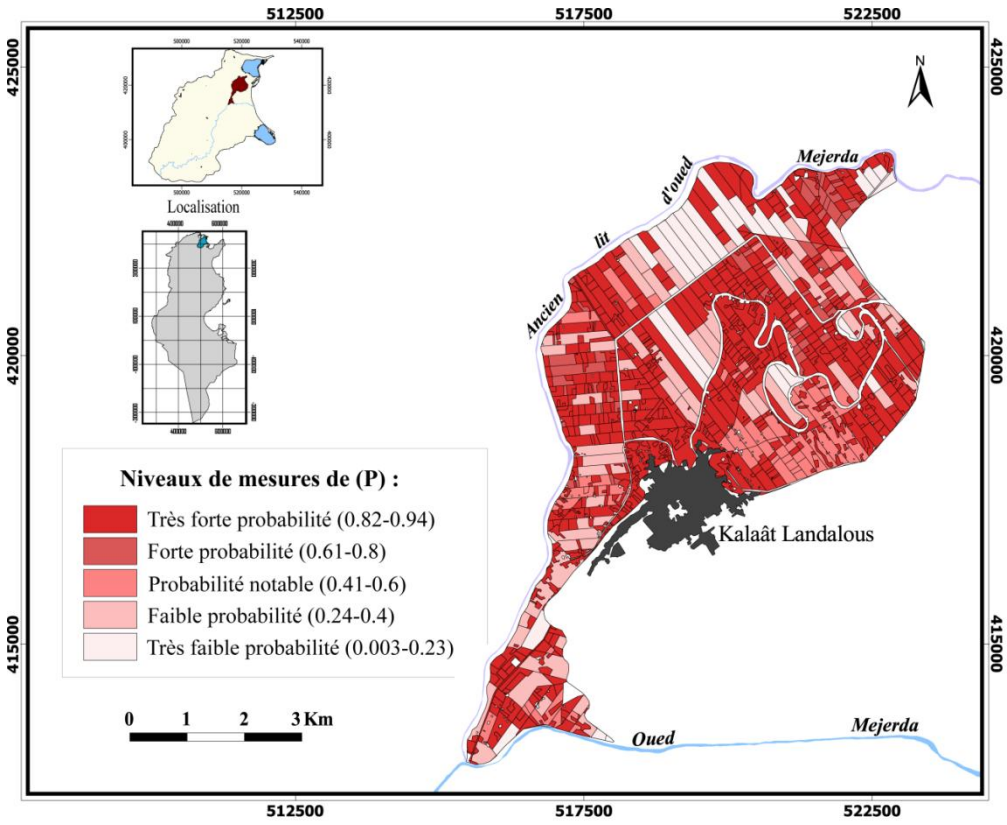
Variables explicatives des changements	Classes ou seuils retenus	Hypothèse « Sols nu à peu couverts »	Hypothèse « Sols couverts »	Incertitude (Union des deux hypothèses)
Proximité de la parcelle par rapport au siège de l'exploitation	1 : parcelle < 500 m du siège d'exploitation	0.35	0.55	0.1
	2 : parcelle > 500 m du siège d'exploitation	0.6	0.2	0.2
	3 : Exploitation sans siège	0.7	0.1	0.2
Taille des parcelles	1 : parcelle > 2 ha	0.5	0.2	0.3
	2 : parcelle < 2 ha	0.2	0.6	0.2
Occurrences des sols nus à peu couverts (1994-1999-2000-2002-2007)	1 : sol couvert tous les hivers	0.005	0.95	0.045
	2 : sol nu à peu couvert durant un hiver	0.01	0.9	0.09
	3 : sol nu à peu couvert durant deux hivers	0.25	0.7	0.05
	4 : sol nu à peu couvert durant trois hivers	0.35	0.3	0.35
	5 : sol nu à peu couvert durant quatre hivers	0.5	0.2	0.3
	6 : sol nu à peu couvert durant cinq hivers	0.7	0.15	0.15
Système de production	1 : Etendu	0.1	0.8	0.1
	2 : diversifié	0.3	0.6	0.1

Les fonctions de croyance pour l'ensemble des facteurs identifiés sont globalement entachées d'une faible incertitude (tableau n°6). La fonction de masse la plus importante associée à l'union des hypothèses, est de 0,35. Elle concerne les parcelles caractérisées par un "sol nu à peu couvert durant trois hivers". Une forte incertitude (de 0.3) caractérise les parcelles supérieures à 2 ha et celles qui ont un "sol nu à peu couvert durant quatre hivers". Les autres variables sont plus précises, à titre d'exemple, le classe "sol couvert tous les hivers", et le classe "sol nu à peu couvert durant un hiver" sont concernées respectivement par une fonction de masse importante de l'ordre de 0.95 et de 0.9 pour l'hypothèse "sols couverts" (tableau n°6).

3.4.2. La prise de décision :

L'étape suivante consiste à mesurer la probabilité pignistique (P), la croyance (Cr) et la plausibilité (Pl) pour chaque hypothèse. Dans les travaux de CORGNE S. (2004), la probabilité pignistique a été privilégiée pour la prise de décision, « car elle constitue un compromis intéressant entre la mesure "pessimiste" de la croyance ou degré de confiance et la mesure "optimiste" de la plausibilité ».

La répartition des valeurs de probabilité pignistique pour l'hypothèse « sols couverts » montre l'importance de cette classe sur le périmètre irrigué de Kalaât Landalous. En effet, près de 744 parcelles (75.6 %) d'entre elles ont des valeurs supérieures à 0,8 soit une « croyance » très forte d'être évolue en sols couverts durant l'hiver 2008-2009 (ill. n°12).



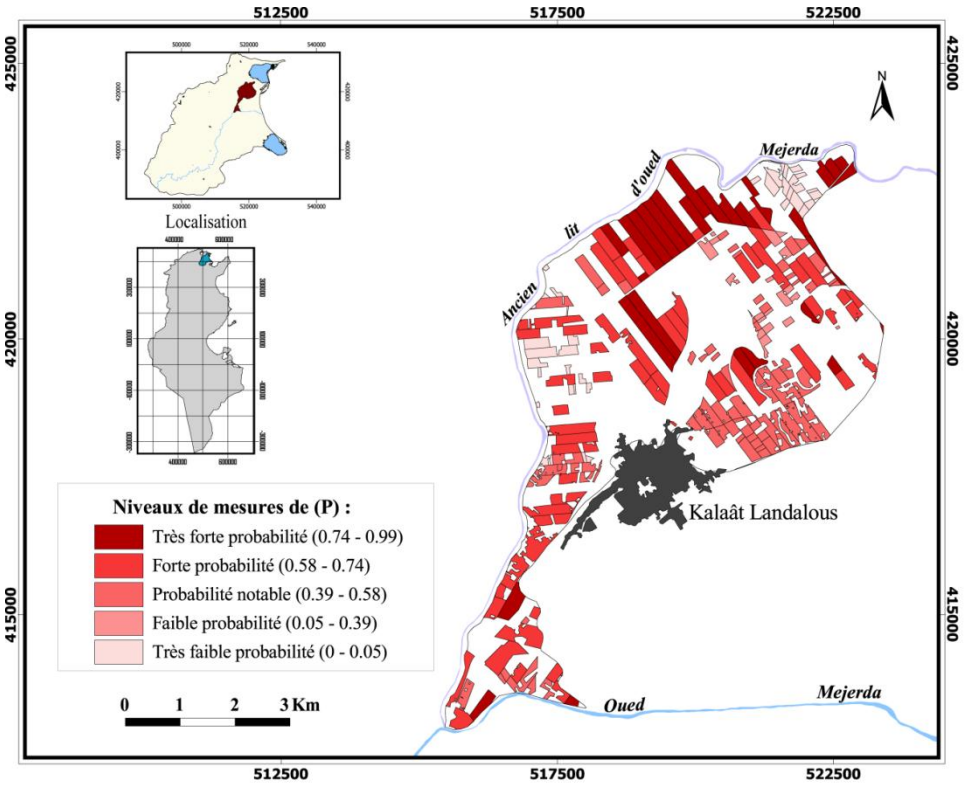
ill. n°12 : Répartition des niveaux de probabilités pignistiques pour l'hypothèse « sols couverts » (hiver 2008-2009).

Par contre, seulement 94 parcelles sont affectées d'une faible croyance (< 0,4) et qui sont localisées généralement dans la partie nord du périmètre irrigué. Ce sont généralement de grandes parcelles (de 4 ha à 5 ha) caractérisées par un taux élevé de salinité et sont souvent occupées par des céréales.

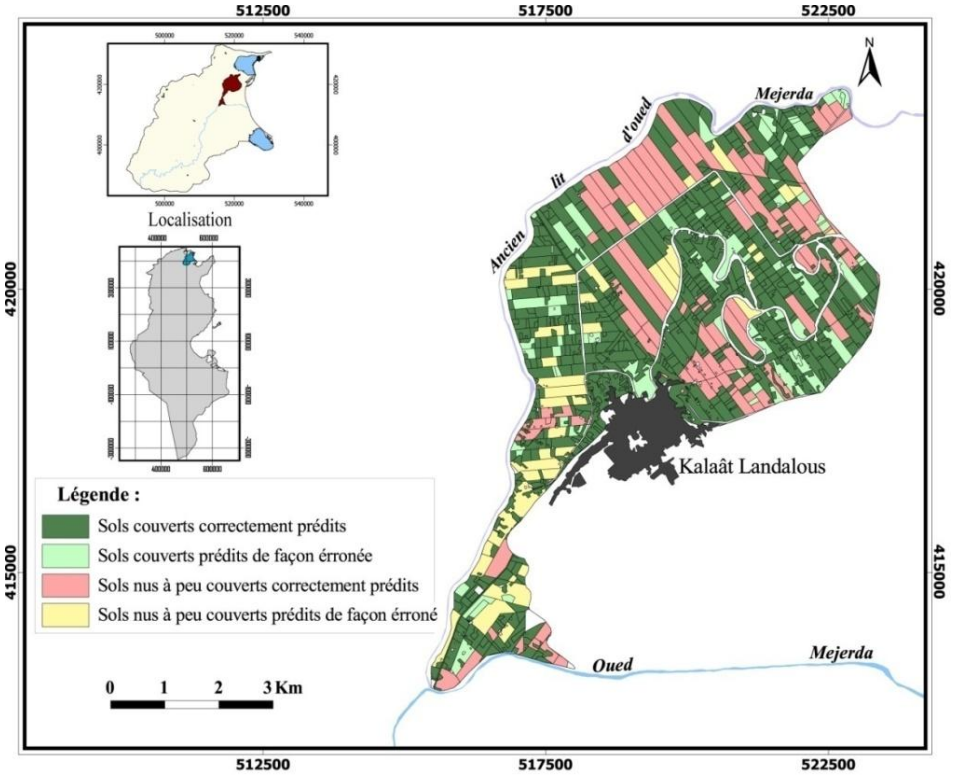
Pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts », on remarque que les parcelles ayant une forte voir très forte probabilité d'évoluer en « sols nus à peu couverts » sont beaucoup plus nombreuses dans la partie nord du périmètre (ill. n°13). Elles sont caractérisées par des tailles importantes et de fortes occurrences de « sols nus à peu couverts » (sol nus à peu couvert durant trois hivers,). Au contraire, la majorité des parcelles sont concernées par de très faibles voire nulle probabilités d'évoluer en « sols nus à peu couverts » ($P < 0.005$).

Faute de documents récents (image satellitaires, photos aériennes, plan d'occupation du sol…) et en raison de la vérification des résultats obtenus pour l'hiver 2008-2009 et de la validation du modèle appliqué, on est obligé de partir sur terrain avec le plan de PPI pendant le mois de janvier 2009 et de vérifier les hypothèses « sols couverts » et « sols nus à peu couverts » et même vérifier le type d'occupation du sol.

Le croisement de la carte d'occupation des sols issue de la vérité terrain pour l'hiver 2008-2009 avec celle de la prédiction (probabilité pignistique pour les deux hypothèses) montre que, spatialement les erreurs de prédiction (sols couverts et sols nus à peu couverts) apparaissent homogènes sur le périmètre irrigué de Kalaât Landalous (ill. n°14).



ill. n°13 : Répartition des niveaux de probabilités pignistiques pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts » (hiver 2008-2009).



ill. n°14 : Croisement de la vérité terrain de l'hiver 2008-2009 avec la carte de prédiction pour les hypothèses « sols couverts » et « sols nus à peu couverts ».

Généralement, on remarque que l'hypothèse « sols couverts » est la mieux prédite. En effet, cette classe couvre 84.8 % des parcelles pour l'hiver 2007-2008 et le taux de prédiction correcte s'élevé à 84,5% (tableau n°7). Par conséquent, on peut dire que l'affectation des jeux de masse est pertinente pour modéliser l'évolution de l'occupation du sol pour cette hypothèse.

La prédiction de l'évolution de l'occupation du sol pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts » est correcte jusqu'à 69.5 % (tableau n° 7). Ce résultat est satisfaisant, car il est très difficile à modéliser ce type de changement qui dépend uniquement du comportement individuel de l'exploitant. Avec un taux de prédiction correcte de l'ordre de 79.3 % pour les deux hypothèses, la théorie des évidences peut être validée pour modéliser l'évolution de la couverture hivernale des sols (à court terme) sur le périmètre de Kalaât Landalous. Ce modèle même, a été accepté (Travaux de CORGNE S., 2004) pour simuler l'évolution des couvertures hivernales du sol sur le bassin versant du Yar (Bretagne, France), avec un taux de prédiction correcte qui ne dépasse pas 73 %.

Tableau n° 7 : Résultats du croisement de la couverture hivernale des sols (2008-2009) issues de la vérité terrain et de la prédiction avec la théorie de Dempster-Shafer.

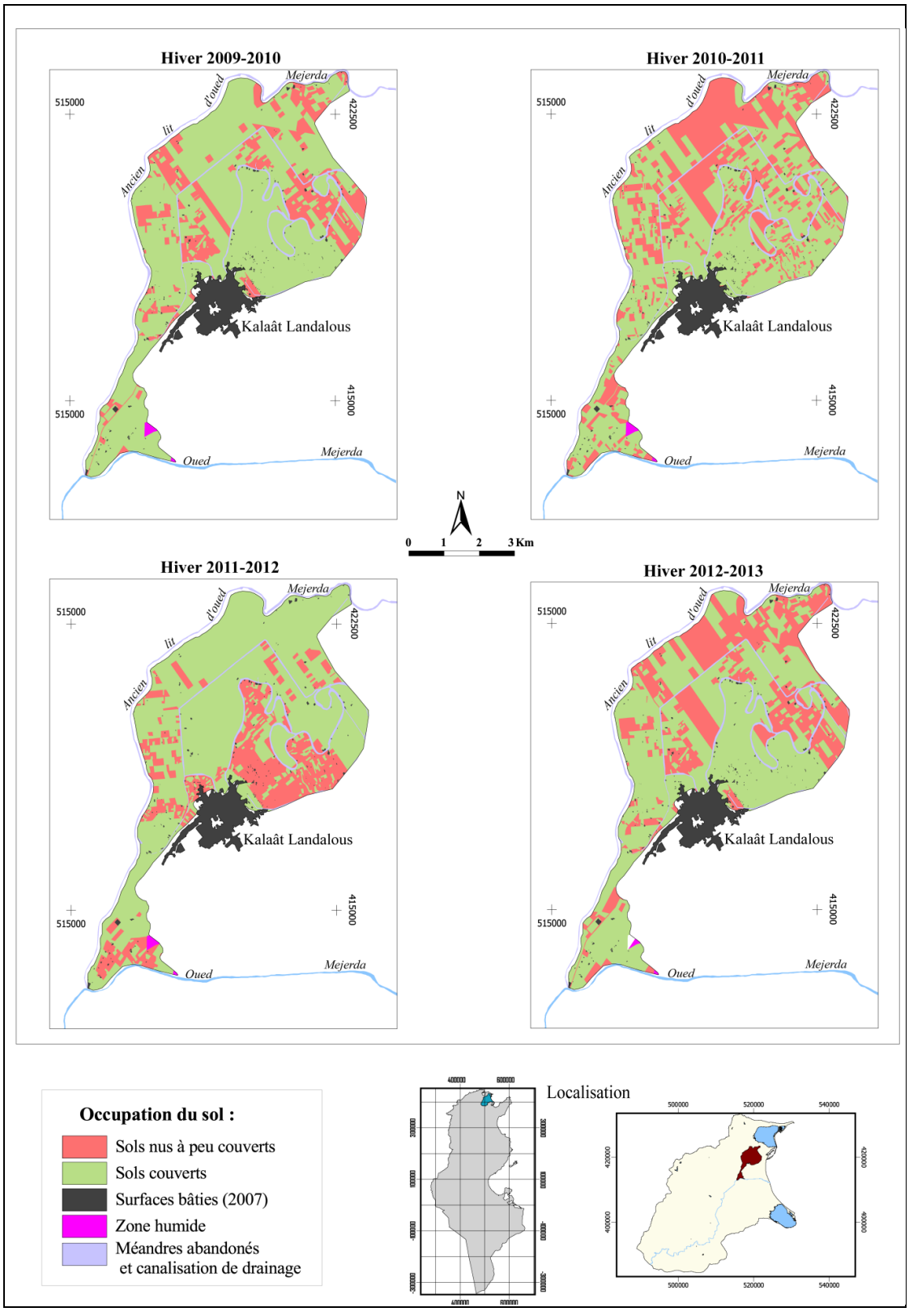
	Occupation du sol pour l'hiver 2008-2009 (vérité terrain)		**Dempster-Shafer Prise de décision (probabilité pignistique)**	
	Nombre de parcelle	Surface (ha)	Nombre de parcelle	Surface (ha)
Sols couverts	801	2007	733	1697 (84.5 %)
Sols nus à peu couverts	143	1053	100	732 (69.5 %)
Total	944	3060	833	2429 (79.3 %)

3.4.3. La prédiction de l'évolution des couvertures hivernales pour la période 2009-2013 :

Dans le but de prédire l'évolution des couvertures hivernales du sol sur 4 ans (de l'hiver 2009-2010 à l'hiver 2012-2013), on a intégré les résultats obtenus pour l'hiver 2008-2009 dans la règle de fusion de Dempster-Shafer (variable explicative de changement "occurrences des sols nus à peu couverts"). Les résultats obtenus figurent dans le tableau n°8, ainsi que l'illustration n° 15.

Tableau n° 8 : Résultats de la simulation des couvertures hivernales du sol avec la théorie de Dempster-Shafer pour les hivers étudiés (2009-2013).

	Hiver 2009-2010		**Hiver 2010-2011**		**Hiver 2011-2012**		**Hiver 2012-2013**	
	Parcelles	**S (ha)**	**Parcelles**	**S (ha)**	**Parcelles**	**S (ha)**	**Parcelles**	**S (ha)**
Sols couverts	760	2440 **(79.7%)**	524	1985 **(64.9%)**	750	2362 **(77.2%)**	728	2098 **(68.5%)**
Sols nus à peu couverts	184	620 **(20.3%)**	420	1075 **(35.1%)**	194	698 **(22.8%)**	216	962 **(31.5%)**
Total	944	3060	944	3060	944	3060	944	3060



ill. n°15 : Prédiction de l'évolution des couvertures hivernales du sol dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous (2009-2013).

On remarque que la modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sur le périmètre irrigué de Kalaât Landalous en utilisant la règle de fusion de Dempster-Shafer

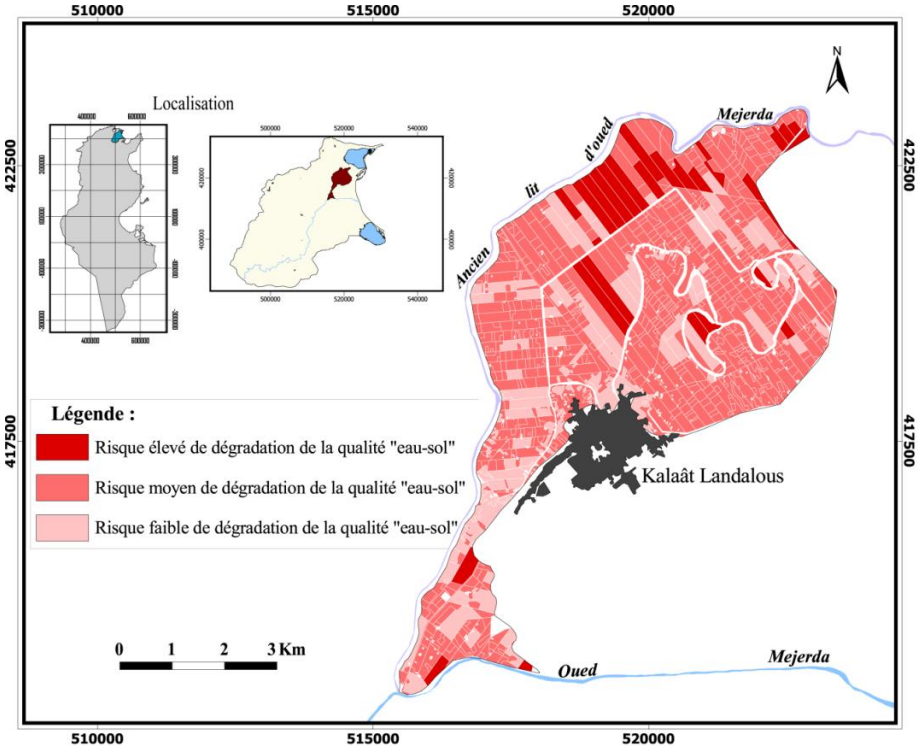
permet de prédire près de 35.1 % (hiver 2010-2011) et 31.5 % (hiver 2012-2013) de la surface totale agricole en faveur de l'hypothèse « sols nus à peu couverts ». Spatialement, la majorité des ces terrains, se localisent dans la partie Nord du périmètre (ill. n°15).

On rappelle qu'au début de ce travail on a posée une problématique concernant l'influence de la succession d'états de couverts végétaux sur les parcelles en hiver. En effet, la proportion de surfaces agricoles laissées nues pour une longue période a un impact sur la qualité de l'eau (et même du sol) en faisant varier les taux de nitrates et de pesticides (excès).

Dans le contexte de restaurer la qualité « eau-sol », il est judicieux de déterminer les occurrences des « sols nus à peu couverts » pour les hivers étudiées (2009-2013) et de produire une carte de risque de dégradation de la qualité « eau-sol ». La règle de fusion de Dempster-Shafer permet de prédire près de 32 parcelles (342 ha), caractérisées par « un sol nu à peu couvert durant trois hivers » et près de 146 parcelles (668 ha) caractérisées par « un sol couvert tous les hivers » pour la période 2009-2013.

La carte de risque de dégradation de la qualité « eau-sol » déterminée à partir des occurrences, démontre trois types de parcelles :

- Des parcelles à risque élevé de dégradation de la qualité « eau-sol », qui accélèrent le transfert des flux polluants pendant l'hiver. Elles sont caractérisées par des tailles importantes (> 4 ha) et par une forte occurrence « sol nu à peu couvert durant trois hivers » (ill. n° 16). Spatialement, ces parcelles se localisent dans la partie Nord et se correspondent en grande partie à la zone à risque élevé de salinisation (ill. n° 5) déterminée par les travaux de HACHICHA M. et al., (1997). Ceci, confirme d'une part les résultats obtenus dans l'étude citée précédemment et valide d'autre part un taux élevé de prédiction correcte (4 ans) pour le modèle appliqué.



ill. n°16 : Risques de dégradation de la qualité « eau-sol », déterminés à partir des occurrences « sol nu à peu couvert » pour les hivers de la période 2009-2013.

- Des parcelles à risque moyen de dégradation de la qualité « eau-sol », caractérisées généralement par de petites tailles (< 2 ha) et par un « sol nu à peu couvert durant un hiver » ou par un « sol nu à peu couvert durant deux hivers » (ill. n° 16).
- Des parcelles à risque faible de dégradation de la qualité « eau-sol », caractérisées généralement par des tailles comprises entre 2 ha et 4 ha et par une occurrence nulle puisque les sols sont couverts tous les hivers (ill. n° 16).

Conclusion :

Les techniques et les outils de système d'information géographique utilisés dans cette étude, nous ont permis de réduire les difficultés et de gérer une telle masse d'information. Ils ont apporté une nouvelle vision pour cartographier et modéliser le devenir de l'occupation-utilisation du sol dans le périmètre public irrigué de Kalaât Landalous. L'incertitude qui caractérise fortement les dynamiques spatiales des couverts hivernaux dans le delta, nous a imposé la théorie des Evidences de Dempster-Shafer. Ainsi, des prédictions de la couverture hivernale des sols sont effectuées selon les deux hypothèses « Sols couverts » et « sols nus à peu couverts ». Avec un taux de prédiction correcte de l'ordre de 79.3 % pour l'hiver 2008-2009 (pour les deux hypothèses), la théorie des évidences a été validée pour modéliser l'évolution de la couverture hivernale des sols sur le périmètre de Kalaât Landalous pour la période 2009-2013. Les erreurs de prédiction parfois importantes pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts », indiquent un degré élevé de conflits entre les sources d'évidence. Elles nécessitent d'être prioritairement prises en compte.

Bibliographie :

- BRACKER H. (1996)- Utilisation de la théorie de dempster/Shafer pour la classification d'images satellitaires à l'aide de données multi-sources et multitemporelles ; Thèse de l'université de Rennes I, 178 p.
- CADIC B. & CLOAREC J-C. (1976)- Avant projet de mise en valeur de la plaine de Galaat El Andaleuss ; Etude préliminaire, 83 p.
- CORGNE S. (2004)- Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en Bretagne ; Thèse de doctorat, Université de Rennes 2 – Haute – Bretagne, 230p.
- CRDA de l'Ariana (2009)- Les périmètres irrigués : spéculations et rentabilité économique ; Rapport de synthèse, 98 p. (en arabe).
- CTV de Kalaât Landalous (2009)- Programme structural de la promotion des PPI : Rapport de synthèse, 144 p.
- DEZERT J. (2003)- Fondations pour une nouvelle théorie du raisonnement plausible et paradoxal. Application à la fusion d'informations incertaines et conflictuelles ; Rapport technique, ONERA, 76 p.
- HACHICHA M., M'HIRI A., BOUKSILA F., et BACH HAMBA I. (1997)- Variabilité et répartition de l'argile et de la salinité dans le périmètre de Kalaât Landelous (Tunisie) : application à l'évaluation des risques de salinisation ; Etude de gestion des sols, 4, 1, pp. 55-63.

- HEUVELINK GERARD B.M. & BURROUGH P.A. (2002)- Guest Editorial, Developments in statistical approaches to spatial uncertainty and its propagation; International Journal Geographical Information Science, Vol. 16, n°2, pp 111-113.
- HOUET T. (2006)- Occupation des sols et gestion de l'eau : modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (Application au SAGE du Blavet) ; Thèse de doctorat, Université Rennes 2, 368 p.
- HUBERT-MOY L., COTONNEC A., LE DU L., CHARDIN A. et PEREZ P. (2001)- A comparaison of classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units ; Remote Sensing of Environnement, ed, Elsevier, vol. 75, n°2, pp 174-187.
- LAMBIN E. F. & STRAHLER A. H. (1994)- Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data ; Remote Sensing of Environment, Vol. 48, n°2, pp. 231-244.
- Ministère de l'Agriculture & AHT (1998)- Projet hydro-agricole de Galaat Andalous – Ras Djebel : étude sur la filtration et la qualité de l'eau ; Rapport principal, APS – salinité, 145 p.
- OJIMA D., & MORAN E. (2004)- Global Land Project Draft Science Plan ; 93 p.
- SLAMA F., BAHRI A., BOUARFA S., CHAUMONT C., et BOUHLILA R. (2004)- Pratiques d'irrigation et rôle du drainage pour le contrôle de la salinité : cas du périmètre irrigué de Kalaât Landelous en Tunisie ; Actes du séminaire de Rabat "modernisation de la culture irrigué" – Projet INCO-WADMED, 7 p.