

CARACTÉRISATION DE LA SALINITÉ DES SOLS À L'AIDE DE L'IMAGERIE RADAR SATELLITAIRE : CAS DE LA TUNISIE ET DU MAROC

Par
Meriem Barbouchi
Rachid Lhissou
Karem Chokmani
Riadh Abdelfattah
Abderrazak El Harti,
Nadhira Ben Aissa

Centre Eau Terre et Environnement
Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE)
490, rue de la Couronne
Québec (QC) G1K 9A9

Rapport N° R1480

Octobre 2013

Table des matières

Table des matières	2
Avant-propos	4
Liste des figures	5
Liste des tableaux	7
Introduction	8
1. Matériels et méthodes	10
1.1. Sites de l'étude et travaux de terrain	10
1.1.1. Travaux de terrain sur le site marocain	10
<i>Présentation générale du site marocain : plaine de Tadla</i>	10
<i>Salinité des sols</i>	15
1.1.2. Travaux de terrain sur le site tunisien	19
<i>Présentation générale du site</i>	19
<i>Salinité des sols</i>	25
1.2. Élaboration de la carte de la salinité par interpolation	28
1.3. Données radars satellitaires	29
1.3.1. Prétraitement des données radar satellitaire	30
<i>La calibration</i>	30
<i>L'orthorectification</i>	30
<i>Le géoréférencement</i>	30
<i>La réduction du chatoiement par filtrage</i>	31
<i>Le Masquage de la végétation et du bâti</i>	31
1.3.2. Traitements polarimétriques	33
<i>Méthodologie</i>	33
<i>Décomposition polarimétrique</i>	33
<i>Extraction des valeurs des paramètres polarimétriques selon les données terrain et Calibration des modèles d'estimation de la salinité</i>	36
<i>Calcul des corrélations entre les valeurs extraites et les données terrain par la régression multiple pas à pas (StepWise) ainsi que la validation des modèles développés</i>	37
1.3.3. Traitements interférométriques	37
<i>Analyse de l'image de cohérence interférométrique</i>	37
<i>Générer l'image de cohérence</i>	39
<i>Déterminer la cohérence interférométrique</i>	39
1.3.4. Modélisation de la salinité	41
<i>Calibration des modèles</i>	41
<i>Evaluation des modèles</i>	41
2. Résultats et discussion	43
2.1. Résultats des analyses au laboratoire et des traitements géostatistiques	43
2.1.1. Analyses statistiques	43
2.1.2. Statistique descriptive	43
2.1.3. Corrélation entre les variables étudiées	44
2.1.4. Cartes de la salinité : le site marocain	44
<i>Carte de la salinité de la première campagne</i>	44
<i>Carte de la salinité de la deuxième campagne</i>	46
<i>Carte de la salinité de la troisième campagne</i>	47
2.1.5. Les cartes de la variation de la salinité	48
<i>La carte de la variation de la salinité campagnes 1-2</i>	49
<i>La carte de la variation de la salinité campagnes 2-3</i>	49
<i>La carte de la variation de la salinité campagnes 1-3</i>	50

2.2. Résultats des traitements interférométriques	50
2.2.1. Site marocain	50
<i>Suivi de la variation de la salinité du sol des campagnes 1-2</i>	51
<i>Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 2-3</i>	54
2.2.2. Site tunisien	57
<i>Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 1-2</i>	58
<i>Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 2-3</i>	59
<i>Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 1-3</i>	62
2.3. Résultats des traitements polarimétriques	64
2.3.1. Développement des modèles d'estimation de la CE et leurs validations	64
2.3.2. Analyse des résultats obtenus	66
Conclusion générale	69
Références	71
Annexe A : Observation du sol	76
Annexe B : Les modèles d'estimation de la CE et leur validation — le site marocain	78
Annexe C : Analyse statistique	83
Annexe D : Validation croisée des modèles développés à l'aide de l'interférométrie	86
Annexe E : Photos des campagnes de terrain	91
Maroc	91
Tunisie	92

Avant-propos

Le présent rapport fait état des résultats du projet intitulé « *Caractérisation de la salinité des sols à l'aide de l'imagerie radar satellitaire et les approches de classification orientée-objet : Cas de la Tunisie et du Maroc* », financé dans le cadre du programme de coopération scientifique interuniversitaire de l'Agence universitaire de la francophonie (Réf-6319PS008). Le projet s'est déroulé entre mai 2011 et mai 2013. Il visait à explorer la capacité du radar satellitaire à détecter la variation spatio-temporelle de la conductivité électrique, seul indicateur quantifiable de la salinité du sol, et ce dans deux contextes différents. Le projet a impliqué deux universités de sud : l'Université de Carthage (École Supérieure des Communications de Tunis École supérieure et l'Institut national agronomique de Tunis, Tunisie) et l'Université Sultan Moulay Slimane (Faculté des Sciences et Techniques à beni – Mellal, Maroc) ainsi qu'une université du nord : Institut national de la recherche scientifique (Centre-Eau Terre Environnement, Québec, Canada). Le projet a permis d'impliquer deux étudiants dont les travaux sont reportés dans le présent rapport. Il s'agit de madame **Meriem Barbouchi**, étudiante en Master spécialisé en lutte contre la désertification et gestion durable des ressources naturelles à l'Institut National Agronomique de Tunis et monsieur **Rachid Lhissou**, étudiant au doctorat en télédétection à la Faculté des Sciences & Techniques de Beni Mellal.

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence spatiale canadienne pour avoir fourni dans le cadre du programme Initiative de recherche sur les applications scientifiques et opérationnelles – Éducation (SOAR-Education, Réf-5088) les données Radarsat-2 utilisées dans le présent projet.

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la plaine de Tadla	11
Figure 2 : La plaine de Tadla	11
Figure 3 : Carte de variation des altitudes dans la zone d'étude	112
Figure 4 : Carte de niveau de la nappe dans le périmètre de Béni Amir.....	13
Figure 5 : Carte de l'état de la salinité de la nappe phréatique du Béni Amir (ORMVAT2004).	13
Figure 6 : situation des points de d'échantillonnage du sol.....	17
Figure 7 : Carte pédologique de la région d'étude (Source: ORMVAT).....	17
Figure 8 : Carte de la salinité dans le périmètre irrigué du Tadla (ORMVAT, 2004)	17
Figure 9 : Localisation de la zone d'étude	19
Figure 10 : Le modèle numérique du terrain de la zone d'étude.....	21
Figure 11 : La carte pédologique du gouvernorat Mahdia (CA, 2002)	211
Figure 12 : Occupation du sol dans la zone de Mahdia.....	233
Figure 13 : La préparation de la pate saturée et l'extraction de l'extrait	31
Figure 14 : Etapes de réalisation du masque de la végétation	331
Figure 15 : Image Landsat TM5 acquise le 14 Octobre 2011	332
Figure 16 : Exemple de masques de végétation réalisés.....	332
Figure 17 : Images RADARSAT-2 avec la végétation masquée	33
Figure 18 : Organigramme de la méthodologie de travail	34
Figure 19 : Décompositions incohérentes.....	36
Figure 20 : Superposition des paramètres polarimétriques avec les données de terrain et les deux techniques de calibration des modèles d'estimation.	38
Figure 21. Diagramme de la méthodologie du travail pour l'analyse de la cohérence interférométrique et la salinité des sols Tunisien et Marocain	40
Figure 22 : Image de cohérence a) FQ7 21Oct-14Nov du site tunisien b) FQ9 27Sep-21Oct du site marocain.....	45
Figure 23. Le variogramme de la première campagne 27 Septembre 2011 pour le site marocain.....	46
Figure 24. Carte de la salinité de la plaine de Tadla de la première campagne 27 Septembre 2011 ...	47
Figure 25. Le variogramme de la deuxième campagne 24Octobre 2011 pour le site marocain.	47
Figure 26. Carte de la salinité de la plaine de Tadla pour la deuxième campagne 24Octobre 2011....	48
Figure 27. Le variogramme de la troisième campagne 18 Novembre 2011	48
Figure 28. La carte de la salinité de la plaine de Tadla pour la troisième campagne 18Novembre 2011	49

Figure 29. La carte de la variation de la salinité de la plaine de Tadla entre les campagnes 1-2 avec masque de végétation.....	49
Figure 30. La carte de la variation de la salinité de la plaine de Tadla entre les campagnes 2-3 avec masque de végétation.....	50
Figure 31. La carte de la variation de la salinité de la plaine de Tadla entre les campagnes 1-3 avec masque de végétation.....	51
Figure 32. L'extraction de la cohérence de l'image radar.....	551
Figure 33. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-2 (27Sep- 21Oct) avec un angle d'incidence 28° dans les polarisations HH, HV et VV	552
Figure 34. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-2 (30Sep-24Oct) avec un angle d'incidence 44°.4 pour les polarisations HH, HV et VV	53
Figure 35. Diagramme récapitulant la pluviométrie enregistré et la date d'acquisition des images et des campagnes de terrain (Site marocain).....	55
Figure 36. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (19Oct-21Nov) avec un angle d'incidence 35°.4 a) HH b) HV c) VV	56
Figure 37. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (24Oct-17Nov) avec un angle d'incidence 44°.4 a) HH b) HV c) VV	57
Figure 38. La méthode de la détermination de la cohérence	58
Figure 39. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-2 (27Sep-21Oct) avec un angle d'incidence 25°.7 a) HH b) HV c) VV	58
Figure 40. Diagramme récapitulant la pluviométrie enregistré et la date d'acquisition des images et des campagnes de terrain	60
Figure 41. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (21Oct-14Nov) avec un angle d'incidence 25°.7 a) HH b) HV c) VV	61
Figure 42. La relation entre la variation de l'humidité du sol et la cohérence pour la campagne 2-3 (21Oct-14Nov) avec un angle d'incidence 25°.7 pour les polarisations HH, HV et VV.....	61
Figure 43. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (20Oct-13Nov) pour l'angle d'incidence 28° HH, HV et VV.....	661
Figure 44. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (23Oct-16Nov) pour l'angle d'incidence 43°.6.....	63
Figure 45. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-3 (27Sep-14Nov) avec un angle d'incidence 25°.7	65
Figure 46 : Calibration par classe d'interpolation et validation du modèle développé pour l'image FQ9 du 27/09/11 sur le site marocain.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : La répartition des sols du gouvernorat Mahdia	222
Tableau 2 : Caractéristiques des images Radarsat-2 qui ont été acquises dans le cadre du projet grâce au programme SOAR-E de l'ASC.....	299
Tableau 3 : Les 20 Paramètres polarimétriques choisis pour l'étude	35
Tableau 4 : Les paires des images utilisées pour la génération des images de cohérence pour les deux sites d'études	39
Tableau 5. Estimation de La performance des modèles par validation croisée (campagnes 1-2).....	54
Tableau 6. Détermination de performance du modèle par validation croisée.....	57
Tableau 7. Détermination de La performance du modèle par validation croisée (campagnes 1-2)	59
Tableau 8. Détermination de La performance du modèle par validation croisée (compagnes 2-3)	662
Tableau 9. Détermination de la performance du modèle par validation croisée (campagnes 1-3)	63
Tableau 10 : Paramètres de performance des modèles calculés pour le site marocain (calibration par classe)	66
Tableau 11 : Paramètres de performance des modèles calculés pour le site tunisien (calibration par fenêtre de 7x7)	67

Introduction

La salinisation des sols présente deux origines, une naturelle et affecte 80 % des terres salinisées, dites salinisation primaire. La seconde est d'origine anthropique, due essentiellement à l'irrigation et appelée salinisation secondaire (IPTRID-FAO, 2006).

Ce phénomène constitue une menace réelle pour la sécurité alimentaire mondiale. En effet, la salinisation affecte déjà 400 millions d'ha et menace gravement une surface équivalente (Legros, 2009).

Les zones les plus menacées sont celles à climat aride à semi-aride. D'après la FAO (2002), la salinisation des sols due à l'irrigation réduit la surface des terres irriguées de 1 à 2 % par an. Les terres semi-arides et arides sont les plus touchées (presque un quart d'entre elles). Afin d'assurer de meilleurs rendements, l'irrigation est une pratique en pleine extension : environ 8,1 millions d'hectares étaient irrigués en 1800, 41 millions en 1900, 105 millions en 1950 et plus de 222 millions d'hectares aujourd'hui. Cette pratique permet d'assurer 40 % de la production vivrière mondiale. Toutefois, elle n'est pas sans risques, en effet, 21 % des terres irriguées souffrent d'engorgement, de salinité et/ou d'alcalinisation qui réduisent leurs rendements. Le processus de salinisation est dû à la mauvaise combinaison d'une forte évaporation et d'un apport inadapté d'eau d'irrigation en relation avec son contenu en sels dissous. Plus l'aridité est forte, plus l'irrigation est incontournable à la culture et plus son usage est risqué (Ruellan et coll. 2008).

La Tunisie et le Maroc, exemple de pays de climat aride à semi-arides, sont menacés par la salinisation des sols. Plus que 8 % de la superficie de la Tunisie et 5 % du Maroc sont déjà affectés par la salinisation à différents degrés (Antipolis, 2003).

La salinisation des sols est caractérisée par son évolution à la fois dans le temps et dans l'espace, vu son ampleur le recours aux méthodes traditionnelles (analyse au laboratoire, terrain) pour son suivi s'avère insuffisant et inadapté à la vitesse d'évolution de ce phénomène. Ceci amène à explorer des méthodes d'investigations plus rapides et assez fiables.

La télédétection spatiale est d'une importance primordiale pour la cartographie et la surveillance des problèmes environnementaux. Les techniques radars et optiques ont montré leur capacité à fournir des informations globales et permanentes de la planète et en particulier dans le suivi et la caractérisation de la surface du sol. Néanmoins, les produits de la télédétection optique restent difficilement exploitables en présence de la couverture nuageuse et dépendent de rayonnement solaire.

Les capteurs radar (Radio Detection And Ranging) sont des outils fiables et assurent la cartographie et la surveillance de la surface du sol quelles que soient les conditions météorologiques (nuages, pluie...) et temporelles (jour-nuit) (Zribi, 1998 ; maitre, 2001 ; Holah, 2005). Parmi les

capteurs radars actifs figure le Radar à Ouverture de Synthèse (RSO) qui a permis d'ouvrir de nouvelles perspectives pour l'observation de la terre grâce à une large amélioration de la résolution spatiale (Maitre, 2001 ; Holah, 2005).

Pour un sol agricole, le signal radar est dépendant principalement des paramètres de la surface exemple la salinité du sol couplé à l'humidité (la présence de sel en solution) influe sur les propriétés diélectriques des sols et par conséquent sur le signal radar. De nombreuses études ont été déjà réalisées sur le potentiel de la télédétection radar à estimer l'humidité et la rugosité du sol (Ulaby, 1984 ; Fung et al, 1992 ; Holah, 2005 ; Demontoux, 2007 ; Zribi 2008 ; chahbi, 2010 Paloscia, 2010). Pour la salinité, les études sont moins abondantes, mais on peut citer celles de (Metternicht, 1998; Aly et coll., 2004; Grissa et coll., 2011).

Le projet vise à explorer la capacité du radar satellitaire à détecter la variation spatio-temporelle de la conductivité électrique, seul indicateur quantifiable de la salinité du sol, et ce dans deux contextes différents. Le choix des terrains a porté sur un périmètre irrigué, à salinisation secondaire, situé dans la plaine de Tadla au Maroc. En Tunisie, on s'est intéressé à la région de Mahdia caractérisée par une salinisation primaire. Dans une partie de ce travail, on a fait appel à la technique de l'interférométrie radar, comme étant une technique de détection de changement des états de surface du sol, afin d'assurer le suivi de la salinisation des sols. L'objectif de cette partie est de développer un modèle empirique qui s'affranchit des caractéristiques d'acquisition des images (angle d'incidence, polarisation...) pour l'estimation de la salinité des sols à partir de la cohérence interférométrique. Dans l'autre partie du travail, c'est la technique de la polarimétrie radar RSO qui est utilisée pour la caractérisation de la salinité des sols, tout en exploitant les données polarimétriques multipolarités et multiangulaires. L'objectif de cette partie est l'utilisation des données polarimétriques de RADARSAT-2 pour la caractérisation de la salinité des sols dans la plaine du Tadla (Maroc central) et la région de Mahdia (Tunisie centrale). Cette évaluation est basée sur la comparaison des données polarimétriques aux cartes de salinité élaborées à l'aide de la spatialisation des données terrain. Des prélèvements de sols et des mesures de conductivité électrique sont effectués parallèlement à l'acquisition des images radars, ce qui a permis d'évaluer l'apport des paramètres polarimétriques dans l'estimation et la cartographie de salinité des sols.

1. Matériels et méthodes

1.1. Sites de l'étude et travaux de terrain

1.1.1. Travaux de terrain sur le site marocain

Les facteurs de la formation des sols salés sont nombreux. Ils peuvent être purement climatiques (Température, niveau des précipitations, absence de drainage, composition de la roche mère) ou induits par l'homme (utilisation de l'eau salée pour l'irrigation). Dans les régions arides et semi-arides, le climat rend l'irrigation nécessaire à toute mise en culture, ce qui exige une maîtrise des ressources en eaux et en sols. Suivant les cas et en fonction des conditions environnementales, les sols contiennent des sels en quantité plus ou moins importante. Dans le sol, la présence d'éléments minéraux en solution est la source des éléments nutritifs pour les plantes. Cependant, avec l'augmentation de quantité de sels dissous apportés par les eaux, le développement des plantes est affecté et induit une baisse des récoltes.

Dans le périmètre irrigué du Tadla, l'utilisation accrue des ressources en eau souterraine et de surface, couplée à l'intensification agricole conduit à la dégradation de la qualité des sols, le phénomène de salinisation constitue un risque de détérioration de la structure des sols. La variation et l'évolution de ce phénomène sont en fonction des propriétés et caractéristiques physico-chimiques du sol et de l'eau et des conditions climatiques de la région.

Le but du travail est d'établir un suivi spatiotemporel de la salinité des sols en prélevant des échantillons sur des stations fixes dans le périmètre irrigué Béni Amir du Tadla pendant trois périodes, septembre, octobre et novembre 2011.

Présentation générale du site marocain : plaine de Tadla

Situation géographique

La plaine agricole du Tadla d'une superficie d'environ 3.600 km² est à environ 200 km au sud-est de Casablanca à une altitude moyenne de 400 m (Figure 1).

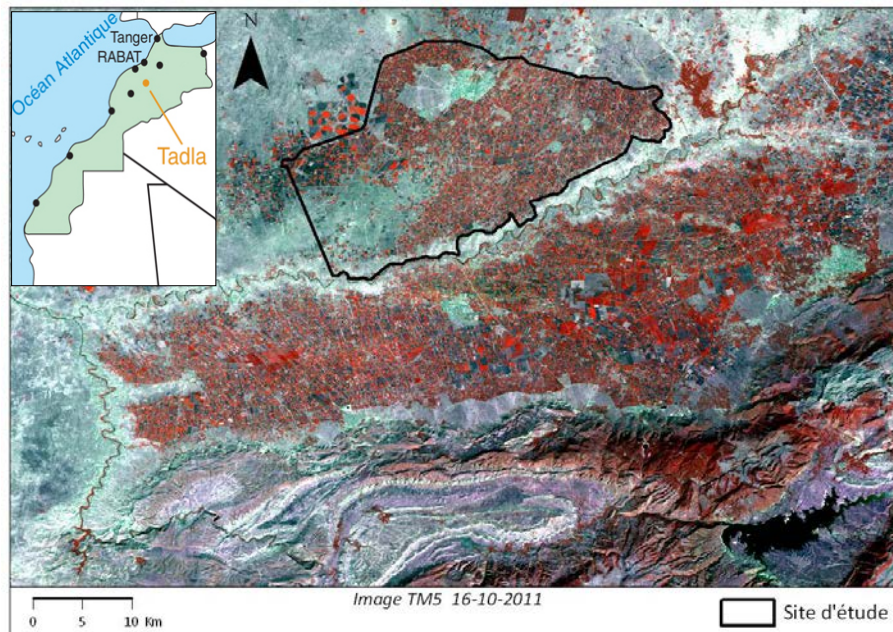


Figure 1 : Situation géographique de la plaine de Tadla

La plaine de Tadla est traversée par l'oued Oum Errabia qui la divise en deux sous-périmètres définis par des caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques différentes (

Figure 2). Le premier sous-périmètre de Béni-Amir est d'une superficie de 27000 ha est irrigué par les eaux régularisées du barrage Ahmed El-Hansali (800 Millions de m³ de capacité) sur les eaux salées de l'Oued Oum Errabia. Ce sous-périmètre représente notre site d'étude qui se situe entre 6° 51' -1" 49.1"W, 32° 19' -1" 40.39"N et 6° 30' -1" 46.85"W, 32° 32' -1" 44.41"N. Le second sous-périmètre de Béni-Moussa est d'une superficie de 69 500 ha, il est irrigué par les eaux du barrage Bin-El-Ouidane (1,5 Milliard de m³ de capacité) sur l'oued El-Abid.

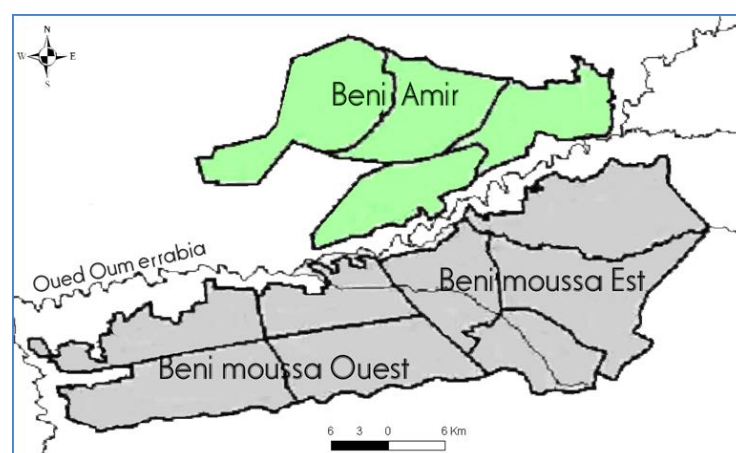


Figure 2 : La plaine de Tadla

Climat

Le climat de la région est de type méditerranéen, aride à semi-aride à caractère continental avec une saison sèche d'avril à octobre et une saison pluvieuse de novembre à Mars.

La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 350 à 500 mm avec une forte variation dans le temps et dans l'espace (Massoni et coll., 1970).

Les températures connaissent de très importantes variations saisonnières : un maximum en août de 40 °C et un minimum en janvier de 3°C.

L'évaporation annuelle moyenne est de 1796 mm et varie entre 1500 mm et 2000 mm. La moyenne mensuelle présente un minimum en décembre (41 mm) et un maximum en juillet (205mm).

Topographie

La topographie de ce périmètre est plane, sauf dans une bande étroite de part et d'autre du lit d'oued Oum ER' Rabia et dans la zone de piedmont de l'Atlas de Béni mellal. Les altitudes varient de 500 m au Nord-Ouest à 344 m au Sud-Est, les pentes sont généralement faibles.

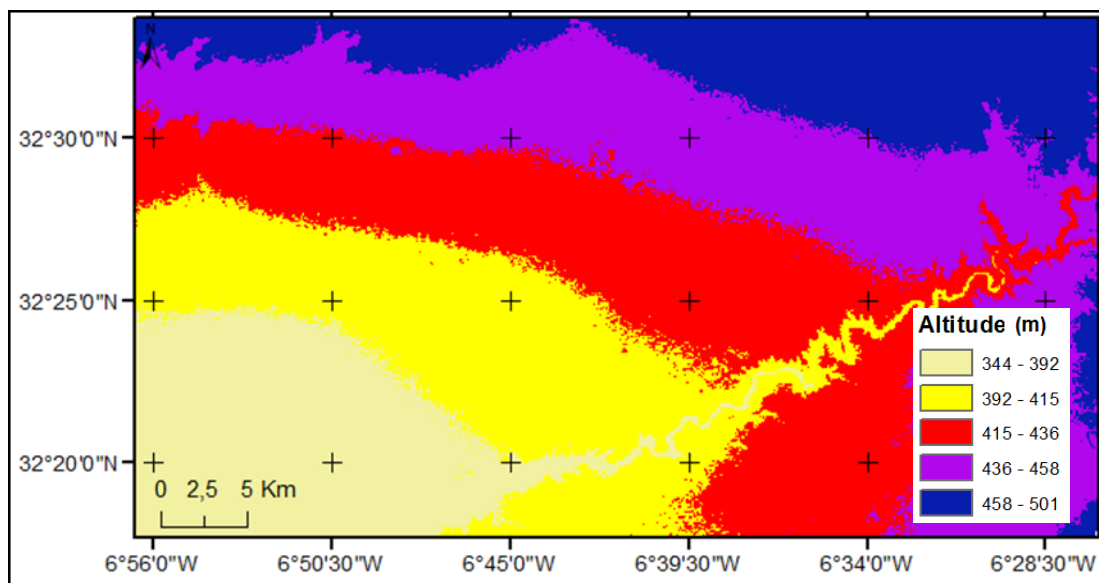


Figure 3 : Carte de variation des altitudes dans la zone d'étude

Hydrogéologie

Le niveau de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué de Béni Amir varie entre 4 et 18 m (Figure 4). Le volume des eaux mobilisables dans le périmètre de Béni-Amir est de 190 M de m³.

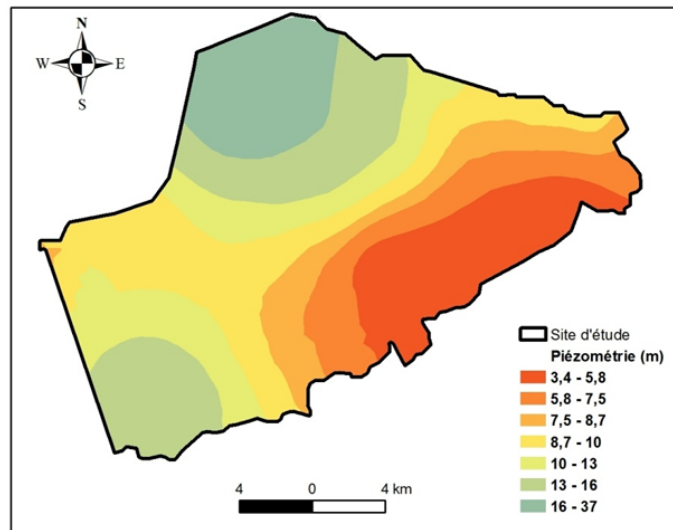


Figure 4 : Carte de niveau de la nappe dans le périmètre de Béni Amir.

Les remontées du niveau de la nappe au-delà d'un certain niveau, soit 2 m de profondeur par rapport à la surface du sol, engendrent de nombreux problèmes d'ordre environnemental, agricole et sanitaire. Notamment, le périmètre de Tadla est confronté à l'accumulation de sels dans les sols et dans les eaux souterraines (Figure 5). La figure suivante illustre l'état de la salinité de la nappe de Béni Amir :

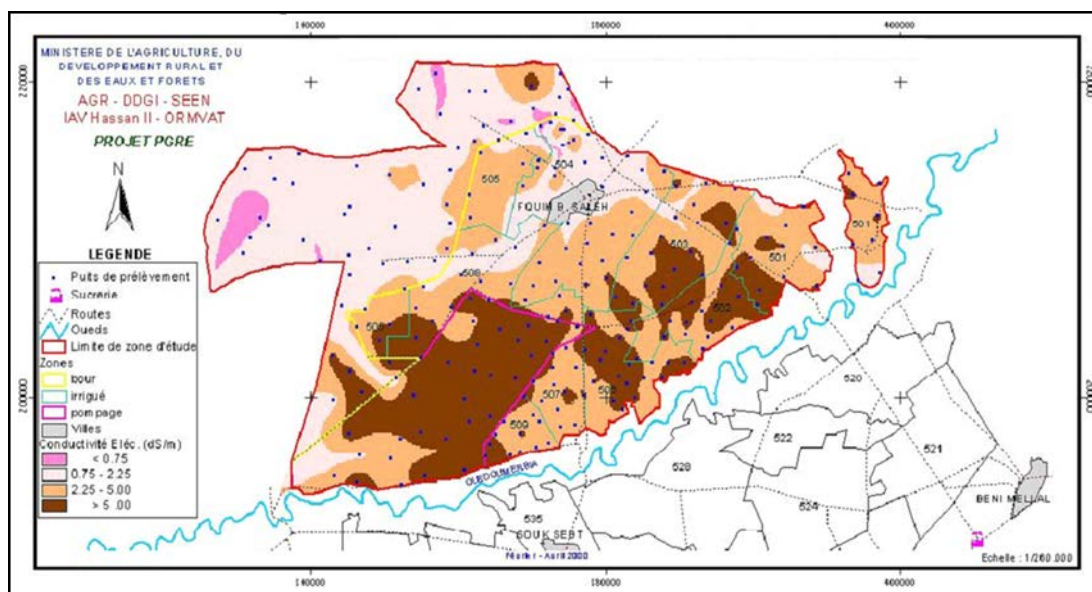


Figure 5 : Carte de l'état de la salinité de la nappe phréatique du Béni Amir (ORMVAT2004).

Différents types des sols

D'après les études de cartographie et de caractérisation des sols qui ont été faites dans la plaine de Tadla, les principaux types des sols qui dominent le périmètre irrigué de Tadla sont (Loukili et coll., 1999; Bellouti et coll., 2002; Badraoui, 2003):

- Sols isohumiques qui comprennent des sols bruns et châtons subtropicaux modaux, et des sols subtropicaux salins et salin-sodiques.
- Sols calcimagnésiques comprenant les sols bruns calcaires et les rendziniiformes.
- Sols fersiallitiques.
- Sols hydromorphes.
- Sols peu évolués.

Sols isohumiques

Ce sont les sols les plus répandus dans les zones irriguées (80 %). Ils sont favorables à la mise en valeur sous irrigation en raison de leur profondeur et de leur texture équilibrée. Ces sols sont répartis en trois sous-groupes.

a/Bruns subtropicaux modaux

Ils sont profonds, ayant une bonne réserve en eau facilement utilisable qui dépasse 60 mm et une texture équilibrée argileuse. Ils présentent un gradient calcaire croissant avec la profondeur (10 à 20 %) et peuvent reposer sur une dalle calcaire dure.

b/Bruns subtropicaux salins et/ou alcalins

Ce sont des sols profonds à moyennement profonds, reposant sur une dalle épaisse ou croûte friable. Leur réserve en eau facilement utilisable est en moyenne de 40 à 50 mm et leur texture est argileuse et argilolimoneuse.

c/Châtons modaux

Sols non ou peu calcaires, très profonds, de texture équilibrée et de réserve en eau utilisable qui dépasse 60 mm. Le gradient en matière organique décroît avec la profondeur.

Sols calcimagnésiques

Ce sont des sols peu profonds, très calcaires, caillouteux, mais de texture équilibrée. Ils sont rencontrés en particulier le long d'Oued Oum El Rbia. On y rencontre les rendzines et les bruns calcaires.

a/Rendzines

Il s'agit de sols très peu profonds, très calcaires, caillouteux et ayant une réserve facilement utilisable de moins de 25 mm

b/Bruns calcaires

Ils sont peu caillouteux, reposants sur une dalle ou une croûte calcaire et ils ont une réserve en eau facilement utilisable qui ne dépasse pas les 24 mm.

Sols fersiallitiques

Les sols fersiallitiques (sols à sesquioxydes de fer) sont moyennement profonds, graveleux en surface reposant sur des argiles rouges à silex dont la teneur en calcaire est nulle. La particularité de leurs profils texturaux est sablonneuse en surface et argileuse en profondeur avec une abondance en fer libre (Badraoui et coll., 1989).

Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes sont des sols profonds, peu graveleux, reposant sur une croûte calcaire et située en zone de cuvette ou bas fonds ce qui entraîne une hydromorphe et une accumulation de sels dans le profil. La salure est bien exprimée dans les horizons supérieurs.

Sols peu évolués

Ces sols se caractérisent par une faible altération, ils sont les résultats de l'érosion alluvio-colluvial (Badraoui et coll., 1989). Ils sont formés sur les alluvions récentes originaires de l'Atlas de Béni-Mellal. Ils sont généralement profonds et propres à l'agriculture.

Salinité des sols

La salinité représente la quantité des sels minéraux qui se trouvent dissouts dans la solution du sol. Pour un même sol, elle varie avec la teneur en eau et avec la température.

La phase liquide du sol, comme toute eau arrivant au sol, est caractérisée par la contenance de sels spécifiques. La distribution des ions entre la solution du sol et la phase solide est gouvernée par les propriétés d'échange de la phase solide et contrôlée par le processus d'échange ionique. Dans les zones arides et semi-arides, l'examen chimique de la solution extraite du sol révèle l'existence de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} et NO_3^- comme principaux composants.

Définitions :

Salinité

Par le processus de salinisation, les sels s'accumulent dans le sol. Quand la quantité de sels dans la solution du sol est élevée, ces derniers peuvent se concentrer à la surface du sol et y causer un état appelé salinité du sol.

Mesure de la salinité

La conductivité électrique (CE) est directement proportionnelle à la teneur en sels d'un sol. Elle est exprimée en déci siemens par mètre (dS/m) ou en millimes par centimètre (ms/cm).

On distingue deux méthodes pour mesurer la conductivité électrique :

- L'extrait 1/5 (une masse de sols pour 5 masses d'eau) qui permet d'estimer rapidement la conductivité électrique et la salinité du sol de l'extrait de pâte réalisée en ajoutant 50 ml d'eau distillée à 10 g du sol.
- L'extrait de la pâte saturée qui est plus convenable que l'extrait 1/5 pour les CE supérieures à 0,5 dS/m. Cette dernière est celle que nous avons utilisée dans le présent travail.

Un sol est considéré salin si la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée dépasse 4 dS/m.

Échantillonnage et mesure de la CE :

Choix des sites d'échantillonnage

Pour optimiser le réseau d'échantillonnage, plusieurs critères ont été retenus dans le choix des sites d'échantillonnage :

1. Représentativité spatiale, le réseau représente l'ensemble du site d'étude et des zones à problèmes de salinité (Figure 6 & Figure 8).
2. Répartition spatiale des principaux types du sol (Figure 7).
3. La représentativité des différents Centres de Développement agricole (CDA)

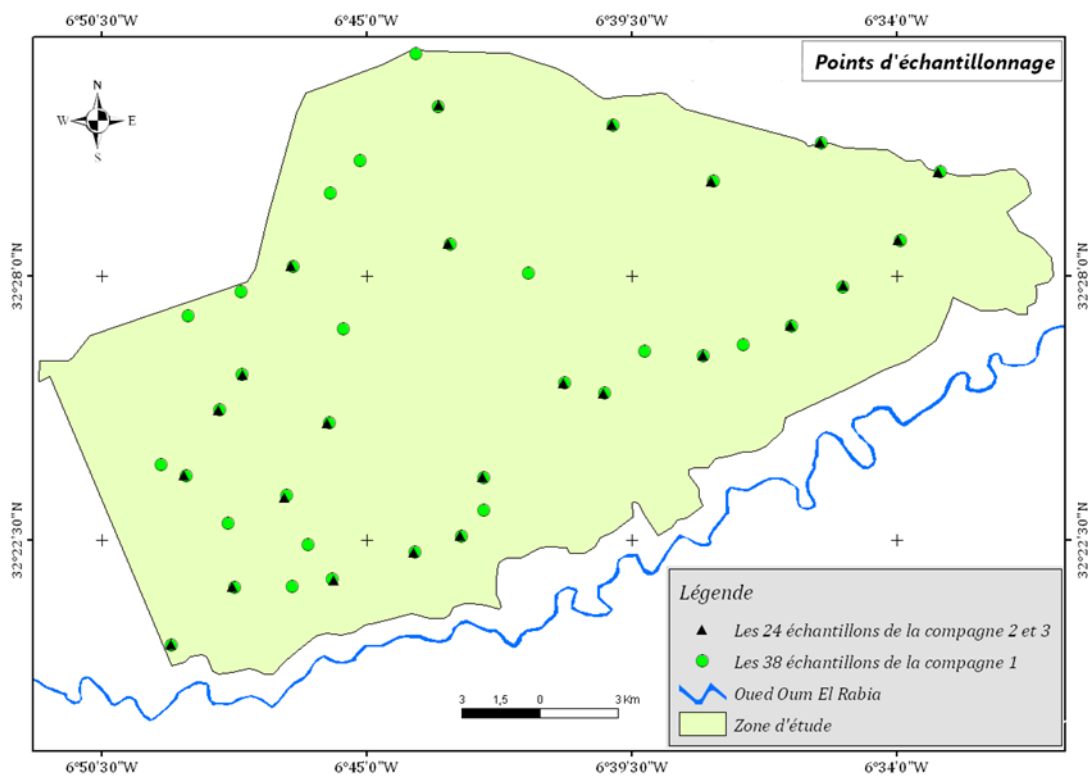


Figure 6 : situation des points d'échantillonnage du sol

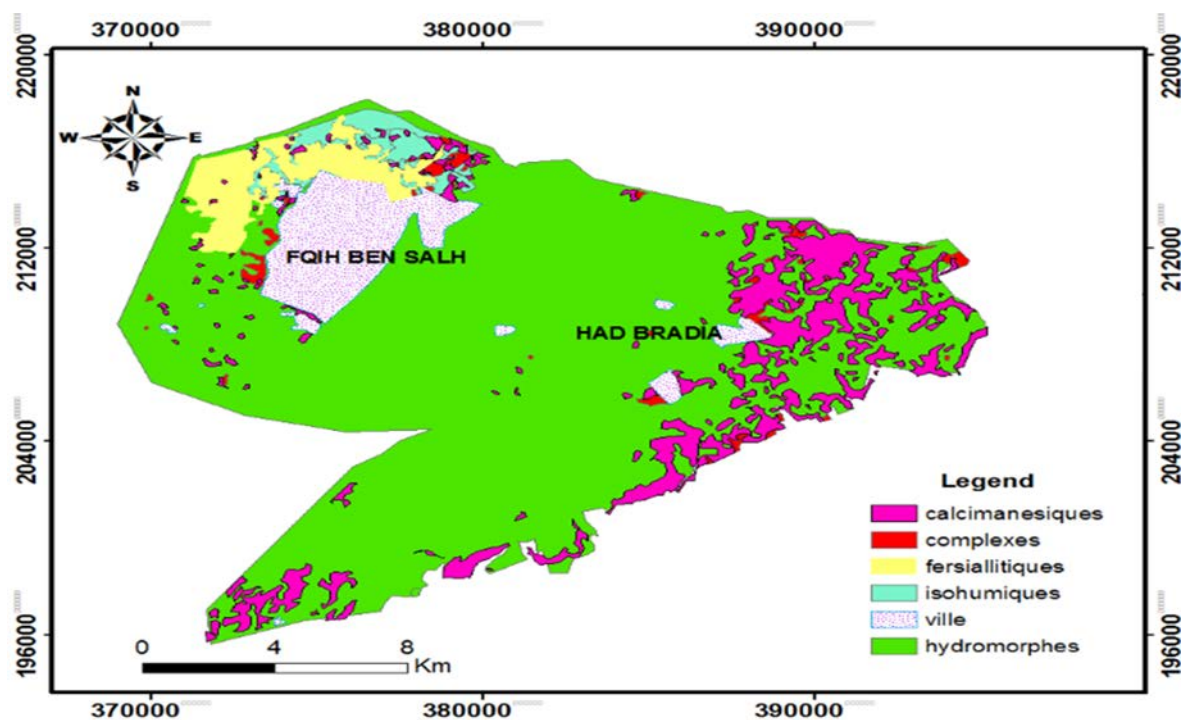


Figure 7 : Carte pédologique de la région d'étude (Source: ORMVAT)

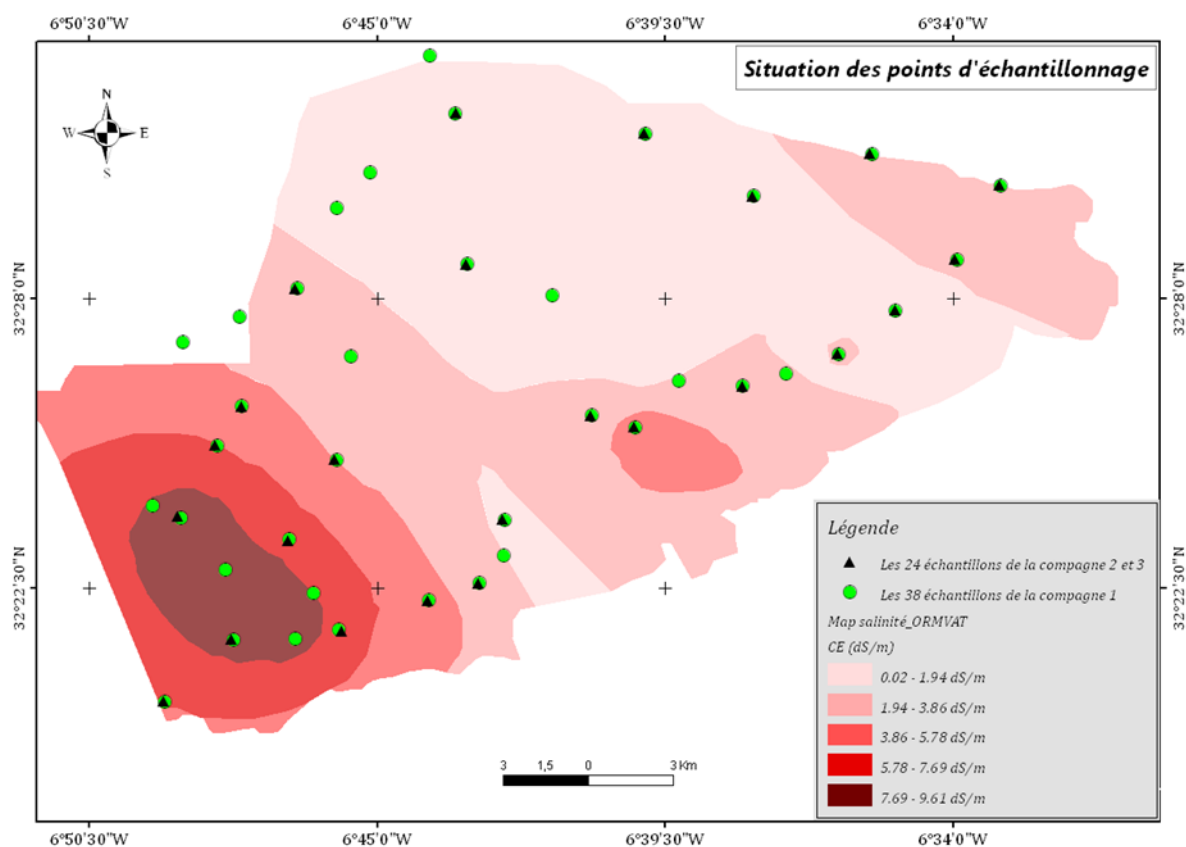


Figure 8 : Carte de la salinité dans le périmètre irrigué du Tadla (ORMVAT, 2004)

Échantillonnage

Les prélèvements du sol ont été réalisés au milieu des parcelles, les échantillons des sols ont été recueillis sur tout le sous-périmètre de Béni-Amir(Fig.3) en trois campagnes de terrain.

La première campagne s'est déroulée le 27 et 28 septembre 2011 avec 38 prélèvements, la seconde a eu lieu le 24 octobre 2011 avec 24 prélèvements et la troisième a eu lieu le 17 novembre 2011 avec 24 prélèvements. Au total, 86 points sont récoltés, la figure 3 montre leur répartition spatiale. Chaque échantillon, d'environ 500 grammes, a été prélevé à partir de la couche supérieure du sol (0 à 5 cm de profondeur), puis localiser géographiquement à l'aide d'un GPS assurant une précision planimétrique de ± 5 m, et photographier à l'aide d'une caméra numérique. En outre, une description sur le terrain a été faite pour chaque échantillon : couleur, texture, cultures et estimation des éléments grossiers.

Analyses au laboratoire

La CE est mesurée à l'aide d'un Conductivimètre. Lorsque la CE est supérieure à 0,5 ms/cm, il convient de préparer la pâte saturée et d'en mesurer l'extrait. On procède par saturation du sol avec l'eau distillée et extraction des sels solubles par centrifugation selon le mode opératoire suivant :

- Mettre 100 g de sol dans une capsule,
- Verser de l'eau distillée contenue dans une burette, progressivement tout en remuant avec une spatule jusqu'à l'obtention d'une pâte onctueuse. La pâte obtenue doit satisfaire les conditions suivantes :
 - Pas d'eau libre dans les dépressions faites dans la masse,
 - Elle doit couler lentement quand on incline la capsule,
 - Sa surface doit être brillante,
 - Elle doit se détacher librement de la spatule,
- Noter le volume d'eau versé,
- Couvrir la capsule et laisser le sol en contact avec l'eau pendant une nuit,
- Ajouter de l'eau si nécessaire, bien remuer et noter le volume ajouté,
- Centrifuger à 2500 tours/min pendant 20 min,
- Récupérer le liquide surnageant dans une éprouvette et en mesurer le volume,
- Verser ensuite l'extrait dans un petit bécher et en mesurer la CE.

1.1.2. Travaux de terrain sur le site tunisien

Présentation générale du site

Situation géographique et administrative

Le gouvernorat de Mahdia se situe au centre est de la Tunisie. Il est délimité au nord par les gouvernorats de Monastir, Sousse et Sebkhia Sidi El Hani, au sud par le gouvernorat de Sfax, à l'est par le littoral méditerranéen de 70 km de long et à l'ouest par le gouvernorat de Kairouan. Il s'étend sur un territoire de 2951 Km² soit 1,9 % de la superficie de la Tunisie.

La zone d'étude choisie se situe entre la délégation de Souassi et celle de Chorban (Figure 9). Elle s'étend entre Sebkhia Echrita et Sebkhia el Ghorra.

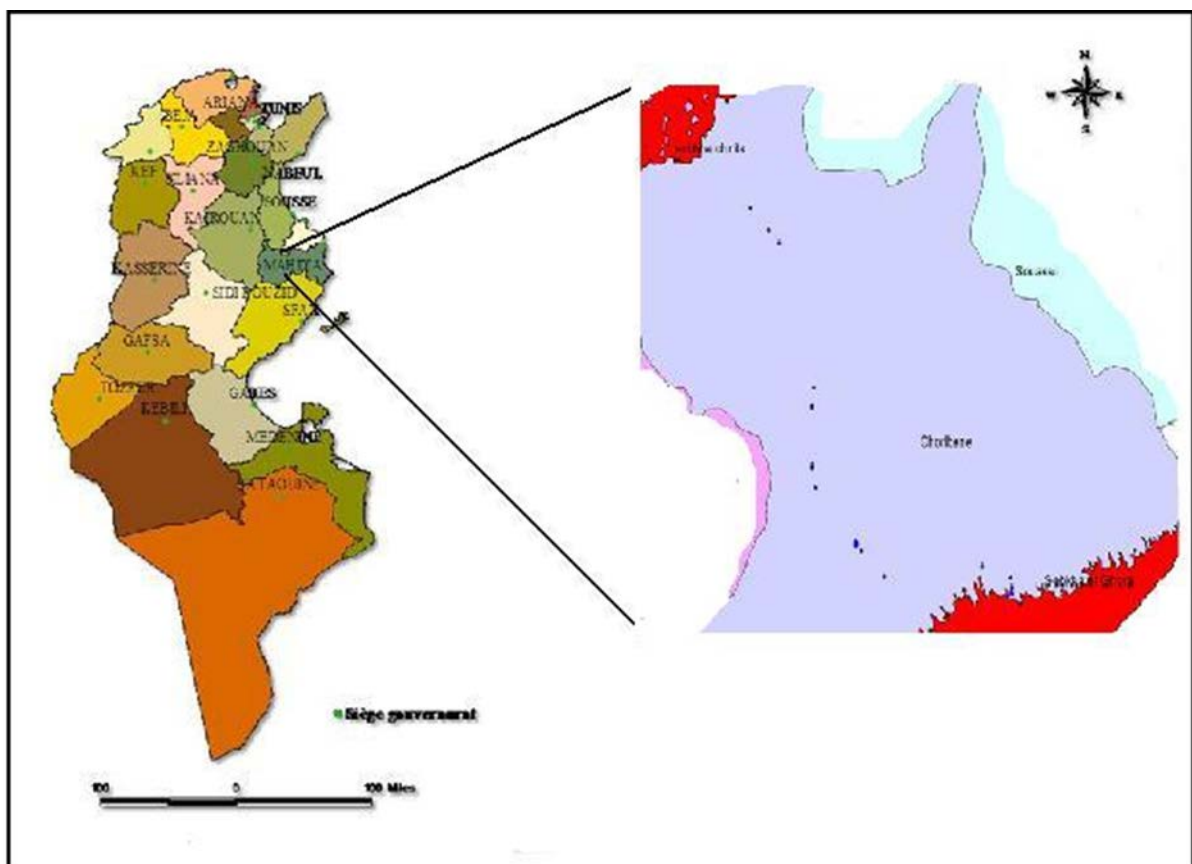


Figure 9 : Localisation de la zone d'étude

Climat

Le gouvernorat de Mahdia appartient à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur. Le climat est de type méditerranéen contrasté, caractérisé par une saison chaude et sèche et une saison froide tempérée plus ou moins humide. Le phénomène d'aridité est atténué par la proximité de la mer, il s'accroît du littoral vers le continent.

Pluviométrie

Dans le gouvernorat de Mahdia, les précipitations annuelles varient de 280 à 400 mm/an, la moyenne sur 10 ans est de 320 mm/an pour les différentes localités avec une augmentation en direction du littoral et des reliefs sud-est.

L'automne reste partout la saison la plus humide et concentre plus de 40 % du total des précipitations. Toutefois, ces pluies sont souvent sous forme de grosses averses, orageuses, violentes et surtout irrégulières.

Évapotranspiration

Dans la région de Mahdia, l'évaporation moyenne annuelle atteint 1700 mm. Les pertes d'eau par évaporation dépassent largement les apports par la pluie, ce qui conduit à un bilan hydrique déficitaire. La plus forte évaporation est généralement enregistrée pendant le mois de juillet.

Géologie et relief

La sebkha de Chritta est drainée vers la sebkha de Sidi El Hani par l'oued Chritta. Elle possède une forme quadratique malgré que ses bordures soient sinueuses par l'érosion. La sebkha d'El Guerra a la forme d'un losange allongé selon la direction N. 69. Elle est reliée à la sebkha d'El Djem par l'oued El Djem, lequel suit l'accident N-S et qui limite la sebkha d'El Guerra à l'est. Plus au nord, l'oued est dévié vers l'est puis vers le sud-est par la faille occidentale du graben d'El Djem.

Les deux sebkhas occupent le centre de deux dépressions séparées par un horst superposé aux plis sigmoïdes de Bouthadi et de Chorbane (Figure 10). Cette structure en horst a une forme sigmoïde bordée par deux failles qui se rejoignent à leurs extrémités NE et SO. De part et d'autre du horst, les sebkhas de Chritta et d'El Guerra sont installées sur des panneaux effondrés. Au nord-ouest, la sebkha de Chritta est limitée par l'anticlinal de Djebel Ktitir.

Au sud-est, la sebkha d'El Guerra est limitée par les plis sigmoïdes d'El Hancha et de Sidi Litayem. D'autre part, la fracturation observée dans les environs de Chritta fait ressortir le découpage en losange selon deux directions essentielles, est-ouest et nord-sud, correspondant à des décrochements respectivement dextres et sénestres.

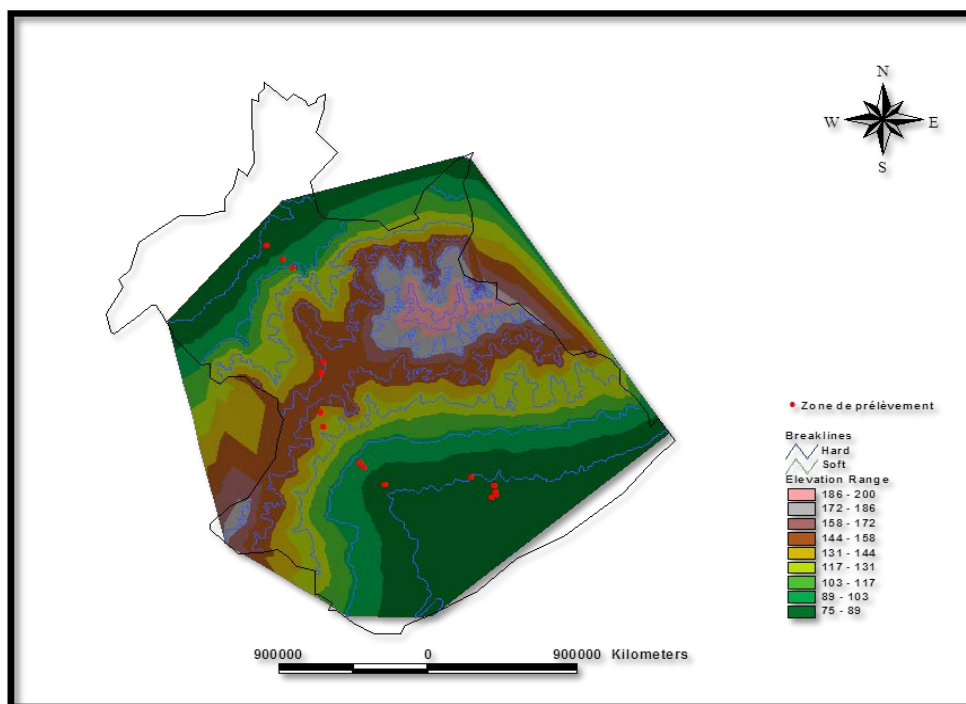


Figure 10 : Le modèle numérique du terrain de la zone d'étude

Pédologie

Deux approches nous ont permis l'inventaire des différents types de sols de la région d'étude. La première s'est basée sur l'étude des documents cartographiques la carte agricole numérique qui permet d'avoir des analyses thématiques assez variées. Ainsi que la carte des classes de sols établie selon la classification française CPCS (1967) du gouvernorat Mahdia (Figure 11). La seconde approche s'est basée sur l'étude de terrain accouplé aux analyses de laboratoire.

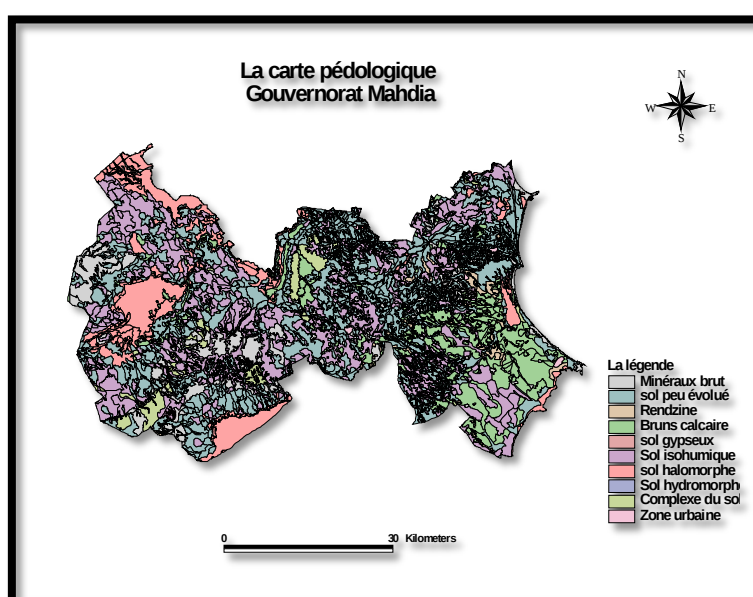


Figure 11 : La carte pédologique du gouvernorat Mahdia (CA, 2002)

Le tableau suivant illustre la répartition des principaux types de sols rencontrés dans le gouvernorat de Mahdia et leurs caractéristiques.

Tableau 1 : La répartition des sols du gouvernorat Mahdia

Type du sol	Superficie en ha	Principales caractéristiques
Minéraux bruts	28 829	Les sols minéraux bruts s'observent sur des roches ou des formations superficielles qui n'ont pas encore subi ou qui ne peuvent pas subir d'évolution pédologique. Pas de développement d'horizons pédogénétiques (sols de profil (A)/C, (A)/R, ou R), ne contenant pas, ou que des traces de matière organique.
Sols peu évolués d'apport	102 864	On différencie les sols peu évolués d'apport alluvial sur les plaines qui sont profonds et généralement de texture fine. Les sols peu évolués colluvial se localisent sur les formations de pente. Ces sols sont moins profonds, mais souvent érodés leur texture est généralement fine à moyenne.
Rendzines	4416	Sols formés sur des roches calcaires dures (des croûtes calcaires), ce sont des sols peu profonds (20 Cm), structurés et assez riches en MO.
Sols bruns calcaires	34 369	Sols moyennement profonds, bien structurés et assez riches en MO : Ce sont des sols fertiles.
Sol hydromorphe	133	Ce sont des sols engorgés d'eau soit d'une façon permanente ou temporelle. Ce sont des sols asphyxiants et nécessitent un aménagement.
Sols isohumiques	78 234	Sols assez profonds, relativement riches en MO qui empreigne le sol sur toute sa profondeur. Ce sont des sols bien structurés et stables.
Sols halomorphes	34 966	Ce sont des sols fortement salés ou sols de Sebkhah qui se caractérisent par une nappe d'eau très salée qui stagne dès la profondeur 30 ou 40 cm. Elle affleure pendant les périodes pluvieuses. L'influence de l'évaporation accroît la salure et provoque une précipitation des sels sous forme d'une croûte saline. La forte salure qui existe en surface empêche le développement de la végétation.
Complexes des sols	8359	C'est un ensemble de quelques types de sols allant des sols minéraux bruts aux sols isohumiques dont leurs superficies ne répondent pas aux normes de l'échelle cartographique.

Ressources en eau

L'irrigation dans le gouvernorat de Mahdia se fait à partir de nappes profondes appartenant à trois ensembles hydrogéologiques.

- Nappe de Zerramedine-Béni hassen : de 200 à 350 m
- Nappe de Souassi : trois sous acquièrent de 60 à 500 m
- Nappe de Sfax : de 250 à 400 m.

Deux contraintes principales : la salinité des eaux souvent supérieure à 4g/l et la faiblesse des réserves qui limite le débit.

Occupation des sols

La majorité de la zone de Mahdia est connue par la dominance de l'oléiculture. Les cultures maraîchères occupent une place considérable dans le paysage agricole de la région. La répartition des superficies selon l'occupation du sol est présentée dans la figure suivante.

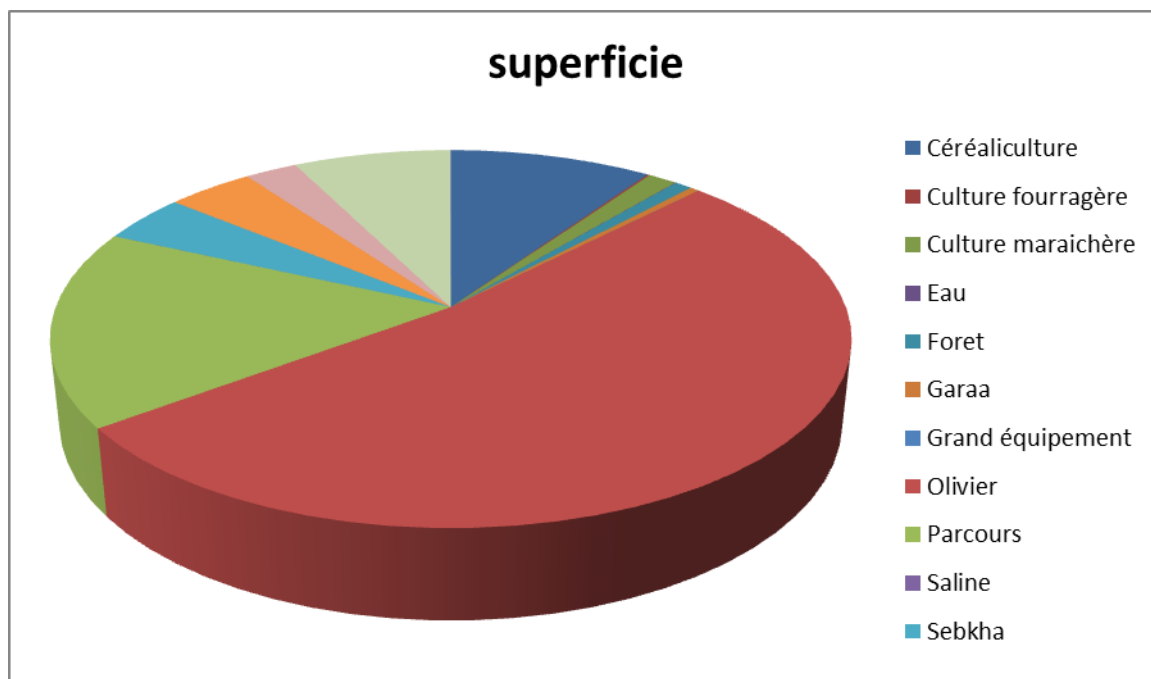
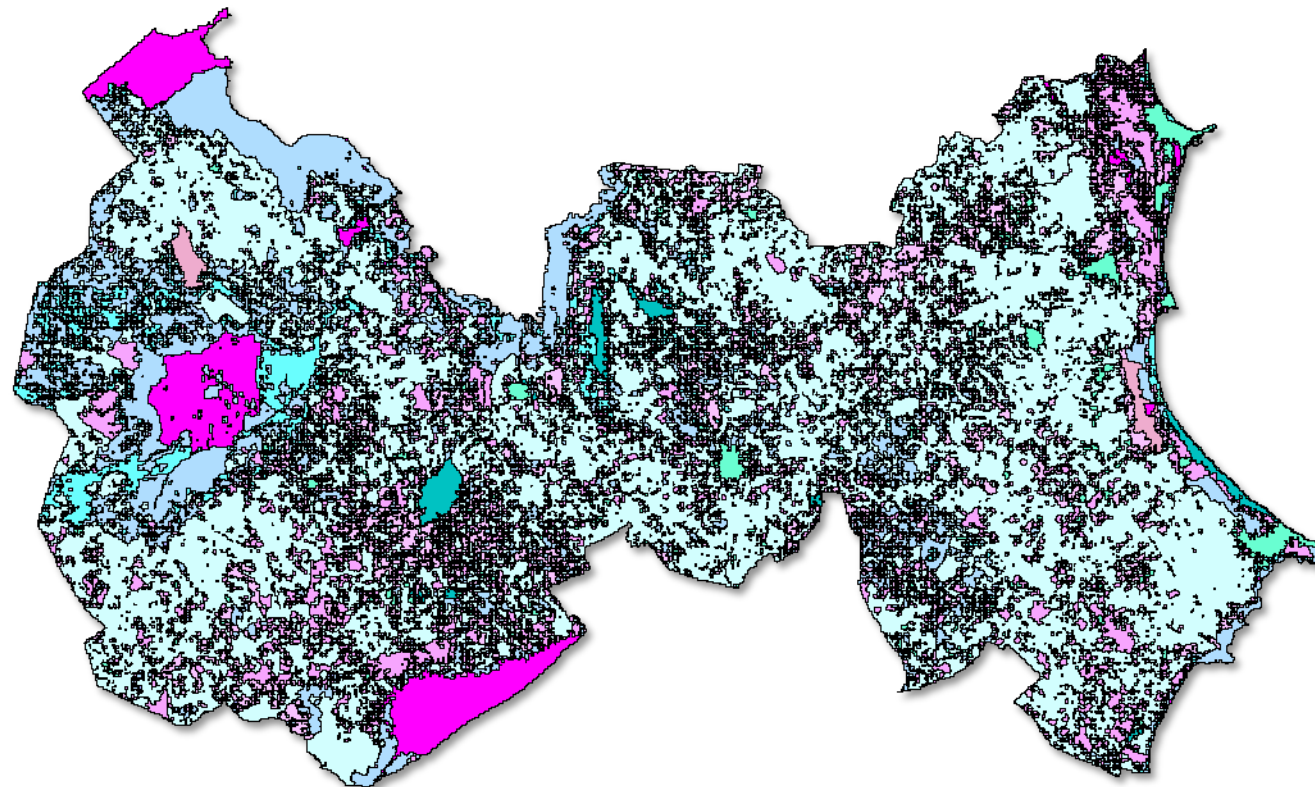


Figure 12 : Occupation du sol dans la zone de Mahdia.

Carte d'occupation des sols Gouvernorat Mahdia



Légende

- céréale
- Culture fourragère
- Culture maraichère de printemps sous olivier
- Culture maraichère été
- Culture maraichère été sous olivier
- Culture maraichère printemps
- eau
- Forêt
- Garaa
- Grand équipement
- Olivier
- parcours
- Saline
- sebkha
- sol nu
- Station d'épuration
- Urbain
- Verger
- Vigne

Echelle : 1/25000

Salinité des sols

Choix des points de prélèvement

Le choix des sites d'échantillonnage a été basé sur la variabilité spatiale de la salinité des sols ainsi que sur le mode d'occupation et l'accessibilité du terrain en toute période.

La zone d'étude étant située entre deux sebkhas, elle présente une importante gamme de salinité allant des sols sains jusqu'aux sols très affectés par la salinisation à partir de la surface. Les sels présents dans les sols présentent deux origines :

- La nappe qui présente une conductivité électrique de $9,25 \text{ ms cm}^{-1}$. Principale source d'irrigation.
- La présence de deux Sebkhas (sebkha El Ghorra et sebkha Chritta).

Protocole expérimental :

Travail du terrain

- Délimitation de la zone d'étude
- Choix des points de prélèvement : quatre critères ont guidé le choix des sites sur le terrain :
 - Le réseau des points d'observation qui doit couvrir toute l'image ;
 - La résolution de l'image ;
 - L'occupation du sol ;
 - L'état de surface et la rugosité.

Matériels utilisés :

- Carte routière afin de localiser la zone;
- Carte agricole comme support numérique avec ses différentes couches telles que la couche pédologique, l'occupation du sol, le réseau routier, les courbes de niveau pour avoir une idée sur le relief;
- GPS pour déterminer les points de prélèvement;
- Appareil photo;
- Marteau;
- Couteau;
- Sachet;
- Marqueur indélébile;
- Mètre pliant;
- Cylindre pour la densité apparente;
- Planchette de bois.

La première campagne : la première campagne a été réalisée le 26 septembre. Il s'agit d'une période sèche ou la dynamique des sels est faible comparée à la période humide ou les redistributions des sels sont importantes.

Au cours de cette campagne, nous avons choisi les points de prélèvement des échantillons, et ce en fonction de la réalité de terrain. Pour chaque point ont été déterminées ses coordonnées et son altitude. Les prélèvements ont intéressé les cinq premiers centimètres du sol.

La deuxième campagne : la deuxième campagne s'est déroulée le 24 octobre on a prélevé les mêmes points enregistrés dans le GPS durant la première campagne.

La troisième campagne : elle a été effectuée le 17 novembre. On a suivi les mêmes itinéraires que la première et la deuxième campagne sauf que durant cette campagne on a déterminé la densité apparente par la méthode de cylindre.

Analyses de laboratoire

Avant d'entamer l'analyse, les échantillons ont été préparés comme suit :

Séchage à l'air libre;

- Fragmentation des agrégats à l'aide d'un mortier;
- Tamisage à 2 mm;
- Mise dans des sachets numérotés.

Les analyses du laboratoire ont porté sur :

- La mesure de la conductivité électrique dans l'extrait 1/5;
- La mesure de la conductivité électrique dans l'extrait de la pâte saturée;
- La détermination du pH;
- L'humidité du sol;
- La densité apparente;
- La détermination des fractions granulométriques : sable grossier, sable moyen et éléments fins.

La conductivité électrique :

L'extrait 1/5

L'extrait 1/5 donne une idée approximative sur la valeur de la conductivité électrique. Afin de préparer l'extrait de 1/5, on pèse 5g du sol tamisé. On ajoute 25 ml d'eau distillée, on l'agite pendant une heure pour faire mobiliser les ions et finalement on mesure la conductivité électrique avec un Conductivimètre.

L'extrait de la pâte saturée

Pour préparer la pâte saturée, on pèse 200g de terre tamisée, on malaxe avec une spatule tout en ajoutant de l'eau distillée jusqu'à obtenir une pâte saturée. On laisse cette pâte se reposer pendant 24 heures afin d'avoir un équilibre (tous les ions seront mobiles dans la solution). L'extraction de la solution de la pâte se fait en utilisant une pompe. Et enfin on mesure la conductivité électrique CE en utilisant un conductivimètre.



Figure 13 : La préparation de la pâte saturée et l'extraction de l'extrait

Le pH

Une suspension de sol (10 g de sol dans 25 ml d'eau distillée) a été laissée pendant 2 heures en agitation puis une demi-heure de repos. La mesure de pH a été effectuée sur cette suspension à l'aide d'un pH-mètre.

L'humidité du sol

L'échantillon du sol a été taré puis séché dans l'étuve à 105 °C pendant 48 heures. Ensuite, l'échantillon a été refroidi puis pesé. La teneur en eau a été calculée en fonction de son poids frais (pH) et son poids (PS) après séchage, selon la relation :

$$W = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

La mesure des fractions granulométrique

La détermination du pourcentage d'argile et de limon se fait en se basant sur le principe de sédimentation selon la loi de Stokes à l'aide de la pipette de Robinson. La détermination des proportions de sable se fait par tamisage.

L'analyse granulométrique a été réalisée sur 20 g de terre fine. Après libération des particules les unes des autres par destruction des ciments organiques et minéraux nous avons procédé à leur séparation. Cette séparation a été faite par sédimentation selon la loi de Stoke pour l'argile et le limon fin. Les prélèvements de ces constituants ont été faits par la pipette de Robinson.

$$\% \text{ argile} = \frac{x_1}{V} \times 1000 \times \frac{100}{y}$$

$$\% \text{ limon fin} = \frac{x_2}{V} \times 1000 \times \frac{100}{y}$$

$$\% \text{Sable} = \frac{z_1}{y} \times 100$$

Avec :

x_1 : poids net de l'argile prélevée dans le volume V de la pipette de Robinson ;

x_2 : poids net du limon fin prélevé dans le volume V de la pipette de Robinson ;

y : 20 g du sol

z_1 : poids du sable refus du tamis.

La densité apparente

Elle a été déterminée par la méthode du cylindre. Elle consiste à enfoncer le cylindre verticalement jusqu'à ce que la surface de la couche mesurée dépasse la section supérieure du cylindre. Et il sera séché au laboratoire puis pesé = M_{sol} .

Ensuite, on mesure le volume du cylindre qui correspond au volume du sol (V_s). La densité apparente est déterminée par la relation suivante et exprimée en (g/cm^3) :

$$d_a = \frac{M_{sol}}{V_{sol}}$$

1.2. Élaboration de la carte de la salinité par interpolation

Une fois les analyses des sols terminées, nous avons restitué les cartes de la salinité en utilisant différentes méthodes d'interpolation dans l'environnement SIG.

Dans le cas du site tunisien c'est la méthode géostatistique, plus précisément le krigeage universel, qui a été utilisée. Ce choix fait suite à plusieurs essais avec les méthodes déterministes et le krigeage ordinaire. Le krigeage universel s'est avéré le mieux adapté à la réalité du terrain, où les points de prélèvement présentent une configuration beaucoup plus linéaire que spatiale, et a fourni les meilleurs modèles.

Il est également utile de noter que la méthode de l'interpolation ne concerne que le site marocain, car ce dernier regroupe les conditions idéales à l'application de cette méthode ; un périmètre irrigué, donc une bonne accessibilité du terrain et par conséquent, une excellente distribution spatiale des points. Contrairement au site tunisien sur lequel nous avons rencontré des contraintes d'accessibilité.

Avant de pouvoir dériver la carte de la conductivité électrique, nous devons répondre à la question suivante : est-ce que cette variable ponctuelle est spatialisable? Pour cela il faut étudier sa structure spatiale à l'aide d'un variogramme. Ce dernier sera élaboré grâce au logiciel Arcgis. S'il s'avère que la variable est spatialisable, l'étape suivante sera l'élaboration de la carte de conductivité électrique pour les trois campagnes du terrain du site marocain.

1.3. Données radars satellitaires

À l'été 2012, l'équipe a placé une demande qui a été acceptée auprès de l'Agence Spatiale canadienne (ASC) dans le cadre du programme SOAR-Éducation (Recherche sur les applications scientifiques et opérationnelles, Projet #5088) pour l'obtention d'un quota d'images Radarsat-2 sur le site marocain et tunisien et concomitant aux trois campagnes de terrain. En tout, 17 images sur 18 planifiées initialement ont été acquises : 8 sur le site tunisien et 9 sur le site marocain. Les images ont été acquises dans mode « Fine Quad Pol » (noté : FQ) ce qui correspond à des images de 25 km x 25 km et une résolution spatiale nominale de 8 m (Tableau 2). Ce mode permet d'avoir accès à toute l'information polarimétrique : toutes les combinaisons de polarisation parallèles et croisées ainsi que l'information sur la phase du signal. L'angle d'incidence des acquisitions varie de 25° pour les images en mode FQ7 à 46° en mode FQ29. Initialement, les acquisitions ont été planifiées pour avoir des paires interférométriques avec les trois images de la première campagne de terrain (septembre) et celles des deux autres campagnes subséquentes. Une paire interférométrique est formée par deux images acquises dans configuration d'acquisition identique (orbite, mode et incidence). Pour ce faire, ces deux images doivent être séparées d'un multiple du cycle orbital du satellite. Dans le cas de Radarsat-2, celui-ci est de 24 jours. En raison de conflit d'acquisition avec des usagers prioritaires, les acquisitions de septembre ont été perturbées (2 images en Tunisie et 1 image au Maroc). Ceci a réduit le nombre de paires polarimétriques en Tunisie à 4 et à 7 au Maroc au lieu de 9 initialement sur chacun des sites.

Tableau 2 : Caractéristiques des images Radarsat-2 qui ont été acquises dans le cadre du projet grâce au programme SOAR-E de l'ASC.

Site	Date	Heure (UTC)	Orbite ¹	Visée	Mode (Incidence)	Angle d'incidence	Campagne terrain
Maroc	27/09/2011	18:22:24	ASC	Right	FQ (FQ9)	28°.0	1
Maroc	30/09/2011	18:34:52	ASC	Right	FQ (FQ26)	44°.4	1
Maroc	02/10/2011	06:23:28	DES	Right	FQ (FQ22)	41°.0	1
Maroc	19/10/2011	06:27:37	DES	Right	FQ (FQ16)	35°.4	2
Maroc	21/10/2011	18:22:24	ASC	Right	FQ (FQ9)	28°.0	2
Maroc	24/10/2011	18:34:52	ASC	Right	FQ (FQ26)	44°.4	2
Maroc	12/11/2011	06:27:37	DES	Right	FQ (FQ16)	35°.4	3
Maroc	14/11/2011	18:22:24	ASC	Right	FQ (FQ9)	28°.0	3
Maroc	17/11/2011	18:34:52	ASC	Right	FQ (FQ26)	44°.4	3
Tunisie	27/09/2011	05:27:58	DES	Right	FQ (FQ7)	25°.7	1
Tunisie	01/10/2011	05:11:20	DES	Right	FQ (FQ29)	46°.0	1
Tunisie	20/10/2011	17:11:50	ASC	Right	FQ (FQ9)	28°.0	2
Tunisie	21/10/2011	05:27:58	DES	Right	FQ (FQ7)	25°.7	2
Tunisie	23/10/2011	17:24:17	ASC	Right	FQ (FQ25)	43°.6	2

Tunisie	13/11/2011	17:11:50	ASC	Right	FQ (FQ9)	28°.0	3
Tunisie	14/11/2011	05:27:58	DES	Right	FQ (FQ7)	25°.7	3
Tunisie	16/11/2011	17:24:17	ASC	Right	FQ (FQ25)	43°.6	3

1 : ASC : Orbite ascendante, DES : Orbite descendante

1.3.1. Prétraitement des données radar satellitaire

Avant tout processus de traitement d'images de télédétection, les images brutes exigent des corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique pour réduire l'incertitude sur les données qui est due, aux perturbations atmosphériques, ainsi qu'aux effets topographiques de la cible. En effet, la calibration des capteurs, les conditions atmosphériques et la géométrie de visée affectent les données enregistrées (Eckhardt et al.1990).

La calibration

Chaque pixel d'une image radar est défini par un compte numérique (CN). Ce compte numérique dépend des paramètres d'acquisition. Il est donc difficile de le comparer d'une image à une autre. Afin de pouvoir effectuer des analyses multitemporelles et comparer différentes images, il est nécessaire de normaliser l'intensité du signal. Cette normalisation est assurée par la calibration radiométrique des images. Ce processus permet de calculer à partir du signal rétrodiffusé une grandeur sans dimension appelée le coefficient de rétrodiffusion σ . La calibration est faite sur les logiciels de traitement d'images ; PolSarPRO et NEST.

L'orthorectification

L'orthorectification a pour but de corriger le déplacement des pixels concernés par les effets du relief en remplaçant les pixels de l'image radar à leurs vraies positions. Cette correction s'effectue à l'aide d'un MNT (Modèle numérique de terrain) et consiste donc à éliminer les déformations géométriques des images radars afin de les rendre conformes à la réalité. L'utilisation du MNT permet la correction des déformations liées au mode de prise de vue du satellite, ainsi qu'à l'angle de visée du satellite et au relief de la zone couverte. Il est donc nécessaire d'effectuer ce traitement sur des images radars acquises sur des zones d'étude plus ou moins accidentées. Un MNT ASTER de 30 m de résolution a été utilisé, le modèle de rectification est celui de Toutin's implémentée dans le logiciel PCI Geomatica.

Le géoréférencement

Le géoréférencement est une action qui consiste à relier un objet et les données qui lui sont associées à sa position dans l'espace par rapport à un système de coordonnées géographiques. Dans ce cas, on a attribué aux images radars leurs coordonnées géographiques sous le logiciel BEAM. Pour

les deux sites d'études, le système de projection est UTM (Universel Transverse Mercator) dans le système géodésique WGS84 zone nord 32 pour la Tunisie et Nord 29 pour le Maroc.

La réduction du chatolement par filtrage

Afin d'améliorer la qualité de l'image radar, il est possible de réduire le chatolement en utilisant des filtres spécifiques. Le filtre utilisé est celui de refined Lee Pol-SAR speckle filter (Lee et coll., 1999), ce filtre utilisé pour une fenêtre d'une taille de 7x7 pixels.

Le Masquage de la végétation et du bâti

Dans le site marocain, il s'est avéré essentiel d'éliminer la végétation à cause de l'importance du couvert végétal. Pour ce faire, des images Landsat optiques de 30 mètres de résolution spatiale acquises parallèlement aux images Radarsat-2 sont utilisées. Les images optiques ont permis de cartographier la végétation avec précision en calculant l'indice de végétation NDVI. À l'aide de ces images, nous avons également masqué les constructions présentes dans la zone d'étude (

Figure 13 à Figure 16).

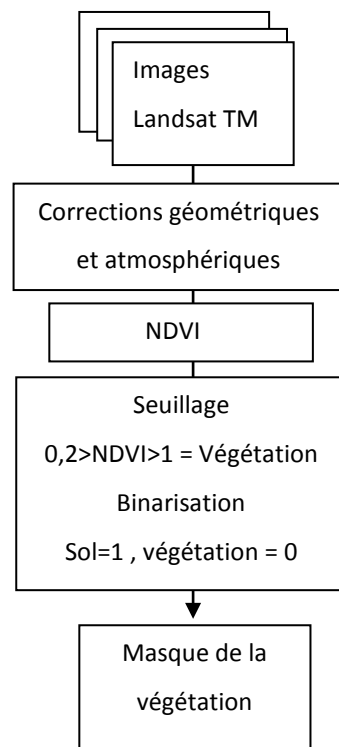


Figure 13 : Étapes de réalisation du masque de la végétation

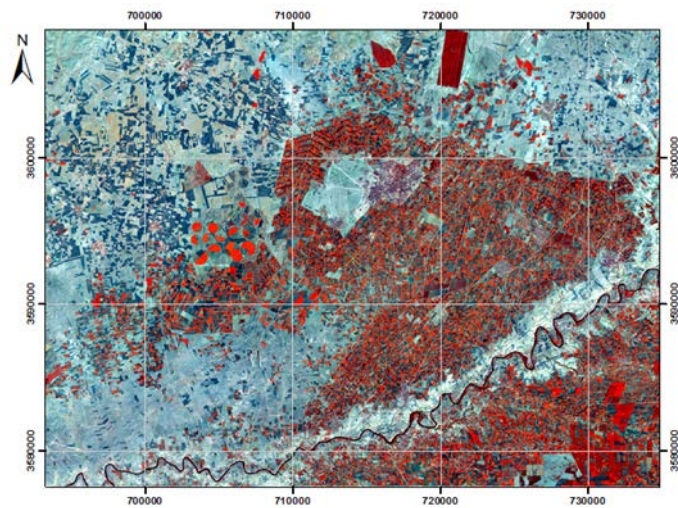


Figure 14 : Image Landsat TM5 acquise le 14 octobre 2011

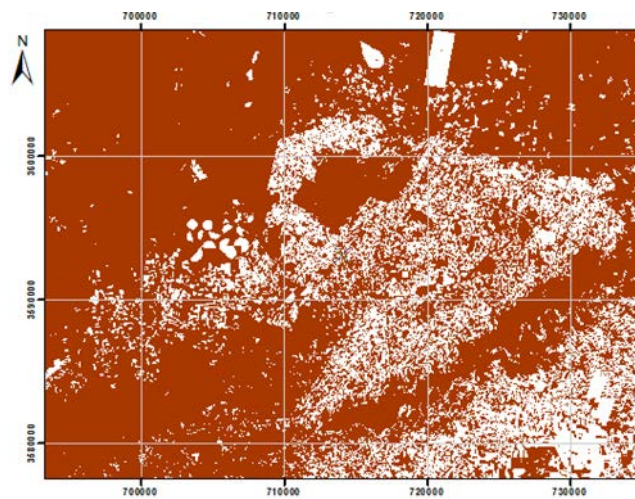


Figure 15 : Exemple de masques de végétation réalisés

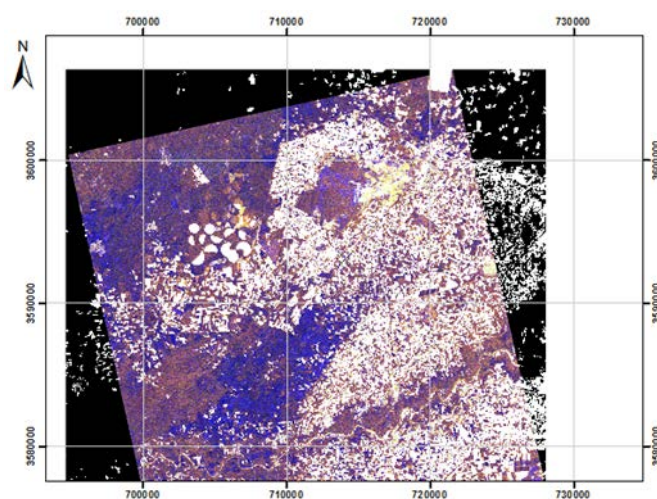


Figure 16 : Images RADARSAT-2 avec la végétation masquée

1.3.2. Traitements polarimétriques

Méthodologie

L'organigramme suivant illustre les étapes suivies pour les traitements polarimétriques des images RSO:

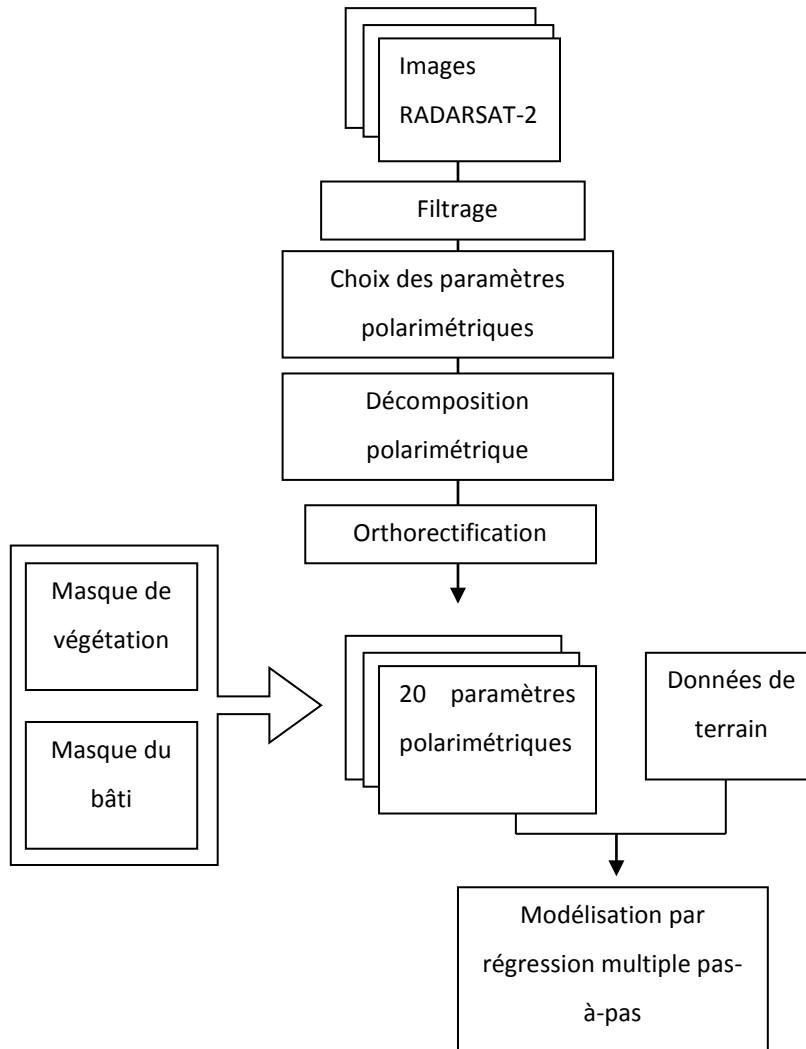


Figure 17 : Organigramme de la méthodologie de travail

Décomposition polarimétrique

L'objectif principal de la décomposition polarimétrique est de décomposer ou d'exprimer la matrice moyenne de rétrodiffusion en une somme de matrices indépendantes représentant des éléments indépendants et d'associer un mécanisme physique avec chaque élément. Cette décomposition facilite l'interprétation du processus de rétrodiffusion et permet de calculer des nouvelles données qui sont les paramètres polarimétriques.

On trouve plusieurs théorèmes de décompositions proposées dans la littérature. Deux grandes classes de décompositions se distinguent, les décompositions cohérentes et les décompositions incohérentes (Cloude et Pottier, 1996).

Décompositions cohérentes (Cloude et Pottier, 1996 ; Lee et Pottier, 2009)

Les décompositions cohérentes sont l'ensemble des théorèmes développés pour une caractérisation de la rétrodiffusion d'une cible. Dans ce cas, on considère la rétrodiffusion de cette dernière comme étant une sommation de cibles pures.

Décompositions incohérentes

En partant des deux représentations équivalentes du signal rétrodiffusé: la matrice de covariance moyenne $[C3]$ et de la matrice de cohérence moyenne $[T3]$, les décompositions incohérentes (Figure 18) reposent sur ces deux matrices (Freeman, Huyné, etc.).

La matrice de covariance est obtenue en multipliant le vecteur de covariance KC par lui-même. Similairement, la multiplication du vecteur KT par lui-même aboutit à la matrice de cohérence.

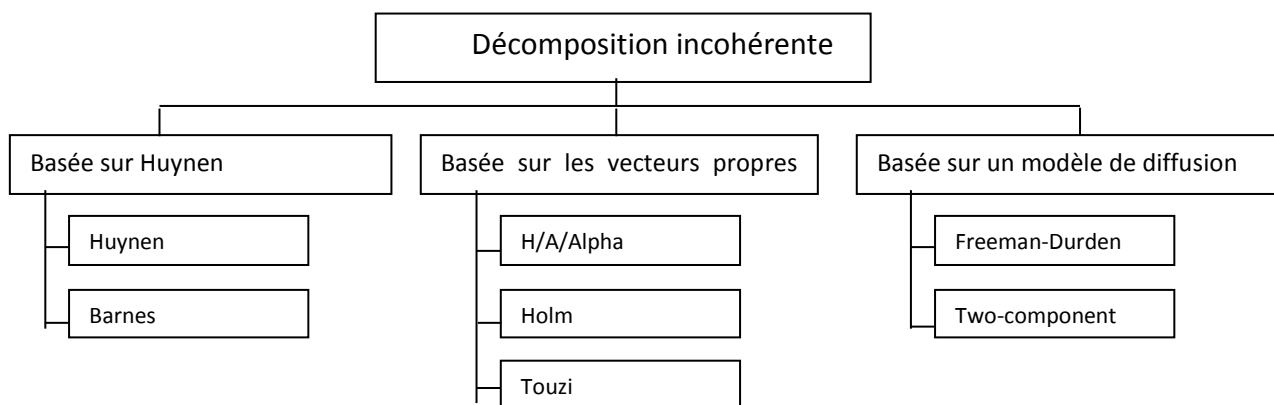


Figure 18 : Décompositions incohérentes

Choix des paramètres polarimétriques

Il existe une centaine de paramètres polarimétriques dans la littérature. Il était essentiel d'évaluer les paramètres ayant un éventuel potentiel d'être sensibles à la constante diélectrique du sol qui est étroitement liée à sa salinité. Une revue bibliographique des paramètres polarimétriques nous a permis de choisir 20 paramètres polarimétriques (

Tableau 3). D'une part, le choix était basé sur la sensibilité des paramètres polarimétriques aux propriétés physiques du sol, d'autre part, nous avons étudié la plupart des paramètres caractérisant la rétrodiffusion surfacique.

Les trois paramètres polarimétriques, H , A , et α , sont invariants par relation autour de l'axe de visée du radar et sont étroitement liés à la structure et aux propriétés géophysiques de la scène

observée (Ferro-Famil et Pottier, 2001). H, A et α sont issues de la décomposition incohérente H/A/ α :

L'entropie (H) représente le comportement aléatoire de la diffusion globale. Elle varie entre 0 et 1. Une faible entropie ($H \sim 0$) représente une réflexion de surface de la cible observée. Par contre, une forte entropie ($H \sim 1$) représente une rétrodiffusion totalement aléatoire.

L'anisotropie (A) représente la distribution des deux valeurs propres les plus petites, c'est-à-dire l'importance de mécanismes de diffusion secondaires (Ferro-Famil et Pottier, 2001). Lorsque les deux mécanismes les plus petits sont égaux, A est égal à 0 ; et lorsque la probabilité du troisième mécanisme est nulle, l'anisotropie est égale à 1.

Alpha (α) représente le mécanisme de diffusion moyenne dominant. Il est calculé à partir de valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence.

$\alpha = 0$ correspond à une réflexion de surface, $\alpha = 45^\circ$ correspond à une diffusion de volume et $\alpha = 90^\circ$ correspond à une double réflexion.

En outre, on a pris en compte :

Les autres paramètres de la décomposition H/A/ α :

- α_1
- Derd
- Serd

Les paramètres issus des décompositions similaires à la décomposition H/A/ α :

- TSVM alphas
- TSVM psi

Finalement, les paramètres polarimétriques qui représentent seulement la composante surfacique de la rétrodiffusion:

- Les coefficients de corrélations : Ro12, Ro13 et Ro23
- Les coefficients de rétrodiffusion : C11, C22, C33, T11, T22, et T33
- Freeman2
- VanZyl3
- Yamaguchi4

▪ alpha	▪ Derd
▪ Alpha1	▪ Entropy
▪ Anisotropy	▪ Freeman2
▪ C11	▪ Ro12
▪ C22	▪ Ro13
▪ C33	▪ Ro23
▪ T11	▪ TSVM alphaS
▪ T22	▪ TSVM psi
▪ T33	▪ VanZyl3
▪ Serd	▪ Yamaguchi4

Tableau 3 : Les 20 Paramètres polarimétriques choisis pour l'étude

La construction d'un modèle nécessitera notamment deux étapes principales:

- Calibration du modèle par la vérification de corrélation (confrontation des données polarimétriques aux observations de terrains), à l'aide des fonctions de régression multiples implémentées dans Matlab;
- Validation du modèle et calcul de ses paramètres de performance.

***Extraction des valeurs des paramètres polarimétriques selon les données terrain et
Calibration des modèles d'estimation de la salinité***

Pour chercher de bons résultats de calibration, on a procédé à une calibration des paramètres polarimétriques par parcelle d'environ 60 m² (fenêtre de 7x7 pixels) et par classe d'interpolation de la conductivité électrique mesurée sur le terrain. L'extraction des valeurs des pixels est faite à l'aide d'un modèle automatique sous PCI geomatica. Ensuite, les statistiques des régions d'intérêts (fenêtres 7x7 et classes de salinité sont exportées sous format 'Excel' pour les traiter sous Matlab.

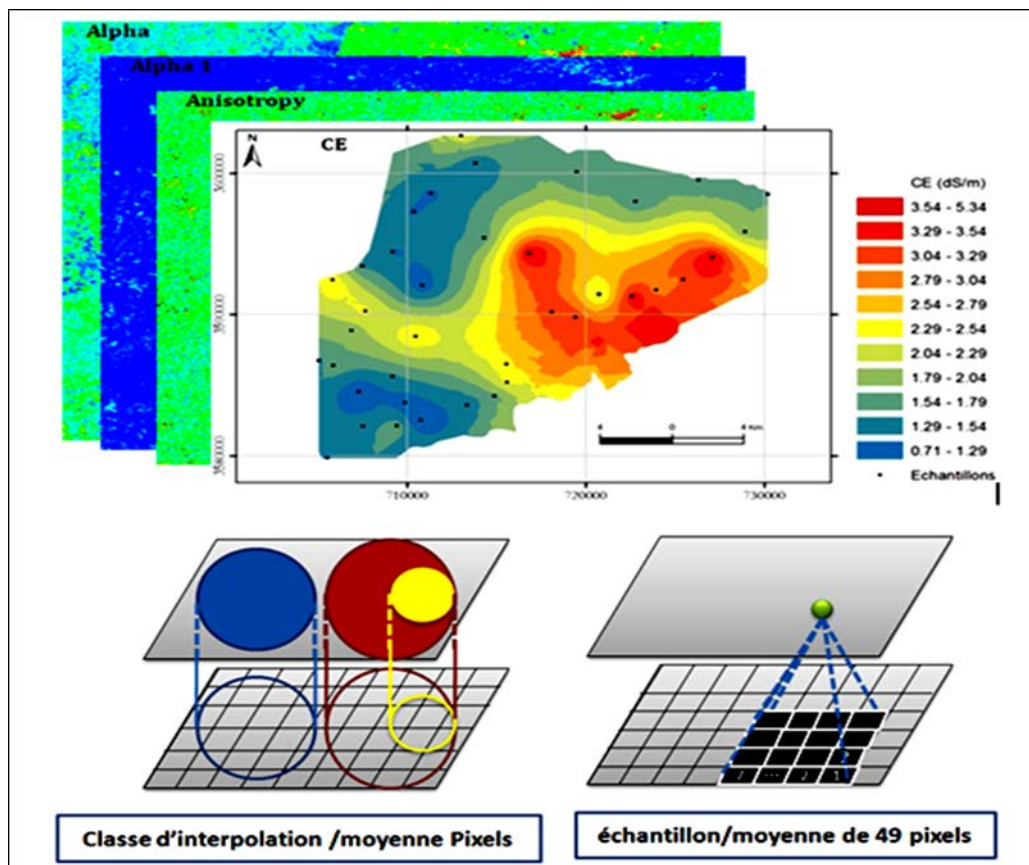


Figure 19 : Superposition des paramètres polarimétriques avec les données de terrain et les deux techniques de calibration des modèles d'estimation.

Calcul des corrélations entre les valeurs extraites et les données terrain par la régression multiple pas à pas (StepWise) ainsi que la validation des modèles développés

La corrélation entre les valeurs extraites à partir des différents paramètres polarimétriques, et les mesures de conductivité électrique sur le terrain est réalisée à l'aide des outils de régression. Cette étape permet de calculer les équations des modèles d'estimation de la conductivité électrique, de valider les modèles développés et de calculer leurs paramètres de performances.

La corrélation est réalisée par la fonction de régression pas à pas (stepwise) sous MATLAB. La fonction pas à pas permet de calculer la corrélation entre la variable expliquée (conductivité électrique) et plusieurs variables explicatives (paramètres polarimétriques) en même temps. La régression pas à pas est conçue pour trouver l'ensemble le plus efficace des variables explicatives dans la prédiction de la variable expliquée. Les variables sont ajoutées à l'équation à la fois, en utilisant le critère statistique pour optimiser le R^2 des variables incluses.

1.3.3. Traitements interférométriques

Analyse de l'image de cohérence interférométrique

L'étude a porté sur l'analyse de 9 couples d'images (Tableau 4) correspondants aux périodes :

- La fin de la saison sèche septembre
- Début d'automne octobre
- Début d'hiver novembre

La Figure 20 présente la méthodologie du travail suivie pour arriver à établir un modèle reliant la variation de la conductivité électrique et la cohérence interférométrique pour les deux sites d'études.

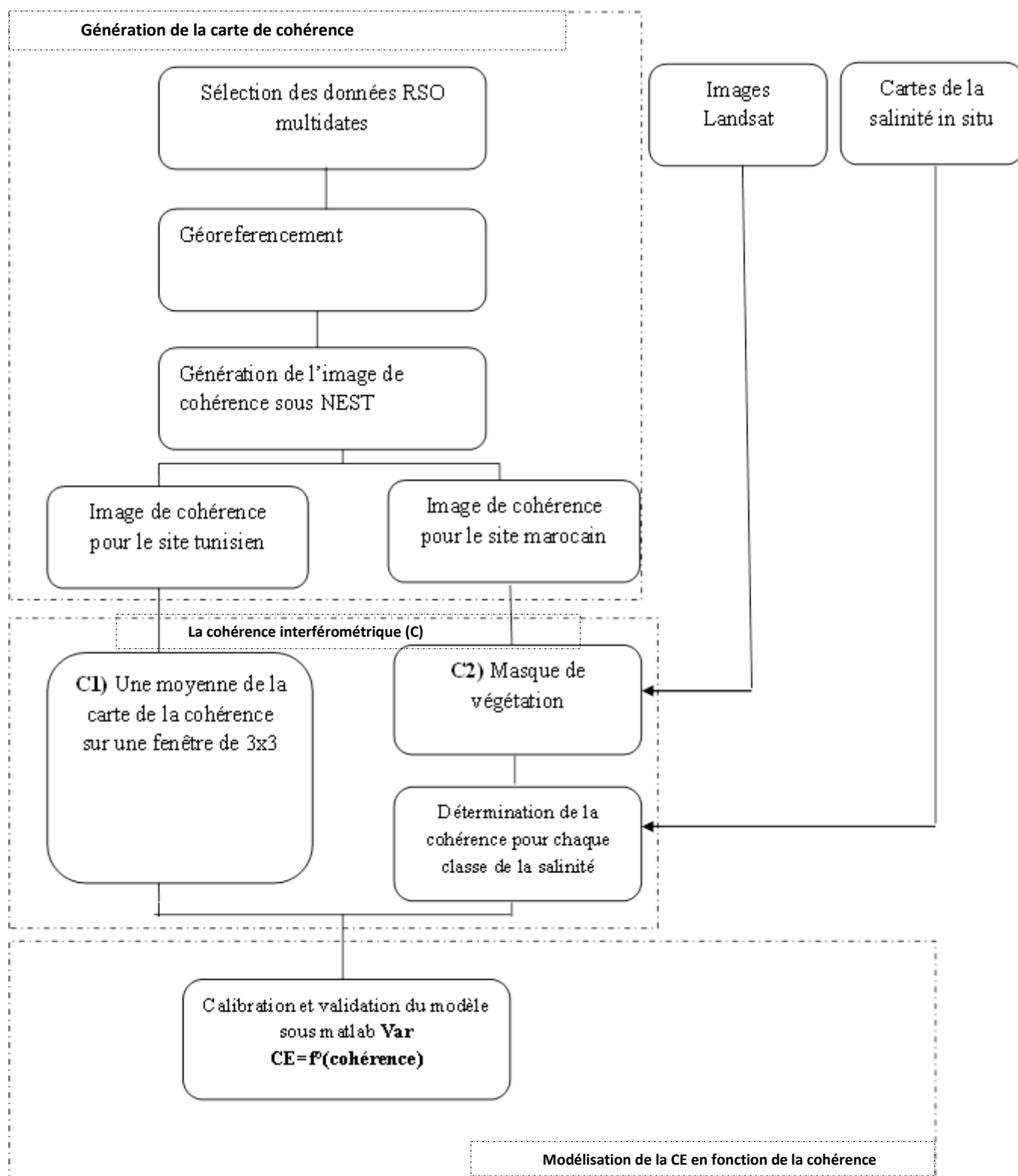


Figure 20. Diagramme de la méthodologie du travail pour l'analyse de la cohérence interférométrique et la salinité des sols Tunisien et Marocain

Générer l'image de cohérence

On a généré une image de cohérence pour les différentes paires (Tableau 4) et pour chacune des polarisations HH/HV/VV. La réalisation d'une image de cohérence passe par plusieurs étapes de traitement interférométrique. Ces traitements ont été effectués grâce au logiciel NEST.

Les étapes de la génération d'une image de cohérence sont les suivantes :

— Co-registation : La différence des positions des orbites et le retard dû aux composants électroniques génèrent des images des deux antennes différentes et étirées les unes par rapport aux autres. Ainsi, cette étape consiste à recalculer l'image esclave sur l'image maître de manière automatique par le biais du logiciel NEST.

-Estimation de la cohérence : l'estimation de la cohérence est une étape importante afin de déterminer la répartition de la cohérence sur l'image et donc la précision de la classification de l'interférogramme en zones fiables et non fiables selon un degré variant de 0 à 1.

Déterminer la cohérence interférométrique

La cohérence interférométrique a été déterminée selon deux différents procédés chacun relatif à la région d'étude considérée :

C1. Pour le site tunisien : en absence de la carte de la salinité, la cohérence a été extraite sur une fenêtre de taille 3x3 par moyennage. On a considéré une cohérence moyenne sur 3x3 pixels ce qui vaut 24x24m pour éviter les erreurs de recalage et de géoréférencement.

C2. Pour le site marocain : Dans ce cas, on a utilisé les cartes de la salinité générées par interpolation. Pour exploiter ces cartes, on a effectué un masquage de la végétation (

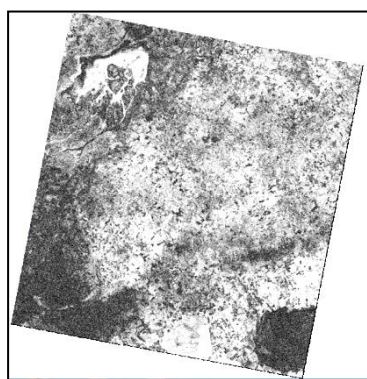
Figure 13). Ainsi, on a déterminé la valeur de la cohérence qui correspond à chaque classe selon les cartes de la salinité.

Tableau 4 : Les paires des images utilisées pour la génération des images de cohérence pour les deux sites d'études

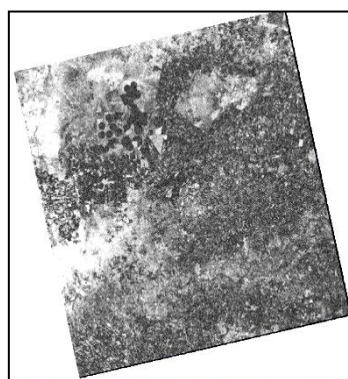
	Date SLC1	Date SLC2	Décalage d'acquisition entre images	Observations	Mode d'incidence
Paire 1 (Tunisie)	27 Septembre 2011	21 Octobre 2011	24jours	Une faible pluviométrie enregistrée le 29septembre et le 21 octobre (<2 mm).	FQ7
Paire 2 (Tunisie)	21 Octobre 2011	14 Novembre 2011	25 jours	Une pluviométrie inférieure à 1 mm le 21 octobre une pluviométrie de 25 mm enregistrés le 3Novembre.	FQ7
Paire 3 (Tunisie)	27 Septembre 2011	14 Novembre 2011	49 jours	Une pluviométrie inférieure à 1 mm le 21 octobre une pluviométrie de 25 mm enregistrés le 3Novembre.	FQ7

Paire 4 (Tunisie)	20 Octobre 2011	13 Novembre 2011	24 jours	Pas de pluviométrie enregistrée les jours de l'acquisition de l'image, mais, entre les deux campagnes il a enregistré des pluviométries 25 mm.	FQ9
Paire 5 (Maroc)	27 Septembre 2011	21 Octobre 2011	24 jours	Entre c'est deux campagnes, il n'a plus de pluviométrie enregistrée.	FQ9
Paire 6 (Maroc)	19 Octobre 2011	21 Novembre 2011	32 jours	Pas de pluviométrie enregistrée les jours de l'acquisition de l'image, mais, entre les deux campagnes il a enregistré des pluviométries de 18, 16 et 10 mm.	FQ16
Paire 7 (Maroc)	23 Octobre 2011	16 Novembre 2011	24 jours	Pas de pluviométrie enregistrée les jours de l'acquisition de l'image, mais, entre les deux campagnes il a enregistré des pluviométries de 18, 16 et 10 mm.	FQ26
Paire 8 (Tunisie)	30 Septembre 2011	24 Octobre 2011	24 jours	Une pluviométrie inférieure à 1 mm le 21 octobre une pluviométrie de 25 mm enregistrés le 3 Novembre.	FQ25
Paire 9 (Maroc)	24 Octobre 2011	17 Novembre 2011	24 jours	18mm ont été enregistrés le 24 octobre (le jour de l'acquisition de l'image) et en plus entre les deux campagnes il a enregistré des pluviométries de 18, 16 et 10 mm.	FQ26

Figure 21 présente deux exemples des images de cohérence générées, une image pour le site marocain (b) et une image pour le site tunisien (a).



a)



b)

Figure 21 : Image de cohérence a) FQ7 21Oct-14Nov du site tunisien b) FQ9 27Sep-21Oct du site marocain

1.3.4. Modélisation de la salinité

Calibration des modèles

L'étape suivante a consisté à l'élaboration des modèles généraux de régression à partir des variables conductivité électrique mesurée in situ et cohérence extraite à partir de l'image radar (interférométrie) et des paramètres polarimétriques (polarimétrie). Il s'agit d'analyser la variation de la conductivité en fonction de la cohérence interférométrique, et de corrélérer la CE avec les paramètres polarimétriques.

Pour les données de cohérence interférométrique, on a utilisé des modèles de régression linéaire simple pour établir le modèle de variation. Pour les données polarimétriques, des modèles de régression multiple exponentiels ont été les mieux adaptés.

Il est à noter que durant la troisième campagne, le terrain a connu des changements dus aux travaux de labour réalisés par les agriculteurs sur le site tunisien. Face à ces changements, l'analyse de la cohérence interférométrique a porté sur un échantillon de 9 points seulement. Dans l'annexe B, on a détaillé les changements pour chaque parcelle échantillonnée (humidité, rugosité, couvert végétal) et on a éliminé les points qui ont subi des variations autres que la variation de la salinité (voir annexe).

Evaluation des modèles

Quatre indices sont utilisés pour évaluer la performance des modèles : le coefficient de détermination (R^2), le biais relatif (BIASr), la racine de l'erreur quadratique moyenne relative (RMSEr), et Nash-Sutcliffe (NR). Ces derniers évaluent la performance du modèle en comparant les valeurs estimées à la valeur moyenne observée sur l'ensemble des données. (Krause *et al.*, 2005).

- Le coefficient de détermination R^2 : est défini comme la valeur au carré du coefficient de corrélation. Il est calculé comme suit:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(Es_i - \bar{Es})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Es_i - \bar{Es})^2}} \right]^2$$

La valeur de R^2 est comprise entre 0 et 1, une valeur de zéro ne signifie aucune corrélation, tandis qu'une valeur de 1 signifie que la dispersion de la prédiction est égale à celle de l'observation (Krause *et al.*, 2005).

- Le biais relatif (BIASr) : le biais relatif est calculé selon l'équation 11.

$$BIASr = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Es_i - O_i}{Es_i} \right)$$

- Le RMSEr : est l'une des statistiques couramment utilisées comme indice d'erreur. Généralement, plus la valeur de RMSEr est faible, plus la performance du modèle est meilleure.

$$\text{RMSEr} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Es_i - O_i}{Es_i} \right)^2}$$

- Le Nash Sutcliffe : est une norme statistique qui détermine l'importance relative de la variance résiduelle par rapport à la variance des données mesurées (Nash et Sutcliffe, 1970). Il est calculé comme suit:

$$Nr = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - Es_i}{O_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\bar{O}} \right)^2}$$

Avec n est la taille de l'échantillon, O et Es sont les valeurs observées et les valeurs estimées, $\bar{O}$ et $\bar{Es}$ sont les moyennes des valeurs observées et des valeurs estimées.

La valeur de NR est comprise entre $-\infty$ et 1,0, avec NR= 1 étant la valeur optimale. Les valeurs comprises entre 0 et 1,0 sont généralement considérées comme un niveau acceptable de performance, tandis que les valeurs <0 indique une performance inacceptable (Moriassi *et al.*, 2007).

La méthodologie adoptée lors des traitements des données nous a permis d'élaborer d'une base de données géographique qui intègre à la fois la conductivité électrique du sol, la cohérence interférométrique et les données polarimétriques générées des images radars.

Ces données vont être exploitées comme entrée pour le suivi de la salinité et la cohérence par la modélisation et pour l'estimation de la CE à l'aide de la polarimétrie. Les résultats ainsi obtenus font l'objet du chapitre suivant en plus de l'analyse statistique des résultats expérimentaux.

2. Résultats et discussion

2.1. Résultats des analyses au laboratoire et des traitements géostatistiques

Les résultats des analyses du laboratoire ont confirmé la présence de trois classes de sols en fonction de la salinité des 5 premiers cm:

- Classe 1 une faible salinité ;
- Classe 2 salinité moyenne ;
- Classe 3 une forte salinité.

La première campagne a révélé la localisation de la classe 3 seulement au niveau des sols limitrophes de la sebkha quelques sols dans la classe 2 et la plupart des sols étudiés sont des sols non affectés par la salinité vue que notre étude porte sur les cinq premiers centimètres où les sels peuvent être lixiviés en profondeur, en plus, l'échantillonnage a été réalisé à la fin de la période sèche où le niveau de la nappe est bas.

Comparant ces résultats avec les classes données par la bibliographie, on constate que les résultats bibliographiques sont exagérés puisque les sols sont classés selon la salinité de tout le profil.

Au cours de la deuxième et la troisième campagne, on constate que d'autres points de prélèvement rejoignent la classe 3 et voient ainsi leur salinité augmenter. Ceci peut être expliqué par la remontée de la nappe suite à la saison pluvieuse.

2.1.1. Analyses statistiques

L'étude statistique vise à dégager la variabilité spatiale des différentes variables mesurées au laboratoire ainsi que leur dépendance. . Les traitements statistiques sont élaborés sous SPSS.

2.1.2. Statistique descriptive

Les tableaux 1,2,3,4 de l'annexe D présentent des statistiques sommaires des résultats analytiques des échantillons.

Les variables CE (1/5), CE (PS), et les pourcentages en sable et en éléments fins montrent les valeurs les plus élevées des écarts types entre les différents points. Ceci traduit une importante variabilité spatiale de ces composantes. Le même résultat a été observé au niveau des trois campagnes d'échantillonnage.

À titre d'exemple, la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée enregistrée lors de la première campagne varie considérablement par rapport à la moyenne, en effet elle présente un écart type de 53.02 ms/cm.

En plus, le site tunisien se caractérise par des altitudes qui oscillent entre 72 m et 152 m. L'analyse du tableau 4 (annexe D) qui regroupe les résultats relatifs au site marocain, indique que les écarts types de la conductivité électrique durant la première et la deuxième campagne sont relativement élevés. Ceci est expliqué par un écart important entre un minimum de 0.7 dS/m pour la première campagne et de 1,1 dS/m pour la deuxième campagne et un maximum de 14.9 ds/m pour les deux campagnes.

2.1.3. Corrélation entre les variables étudiées

Les tableaux 5, 6 et 7 (annexe D) présentent les coefficients de corrélations qui existent entre les différentes variables obtenues pour le site tunisien.

La conductivité électrique est significativement corrélée avec l'humidité du sol et la densité apparente (tableau 5 annexe D, $p < 0.05$). Cette corrélation reste valable pour les trois campagnes.

D'après ces tableaux de corrélation, on constate que :

- Il existe une forte corrélation positive entre la conductivité électrique de la pâte saturée et l'extrait 1/5. Le coefficient de corrélation est de 99 %.
- Une forte corrélation entre la conductivité électrique et l'humidité, une augmentation de l'humidité s'accompagne d'une hausse relative de la conductivité, ceci étant en concordance avec les modèles théoriques.
- La conductivité électrique est corrélée positivement avec la densité apparente.
- La CE est corrélée négativement avec le pH, ainsi l'augmentation de la valeur de pH est accompagnée d'une diminution proportionnelle de la salinité. Ceci peut être dû à la nature des sels.

2.1.4. Cartes de la salinité : le site marocain

Carte de la salinité de la première campagne

Comme il a été mentionné dans la méthodologie, l'élaboration de la carte de la salinité, nécessite d'abord l'étude de la structure spatiale de la variable à l'aide d'un variogramme. La Figure 22 représente le variogramme de la première campagne.

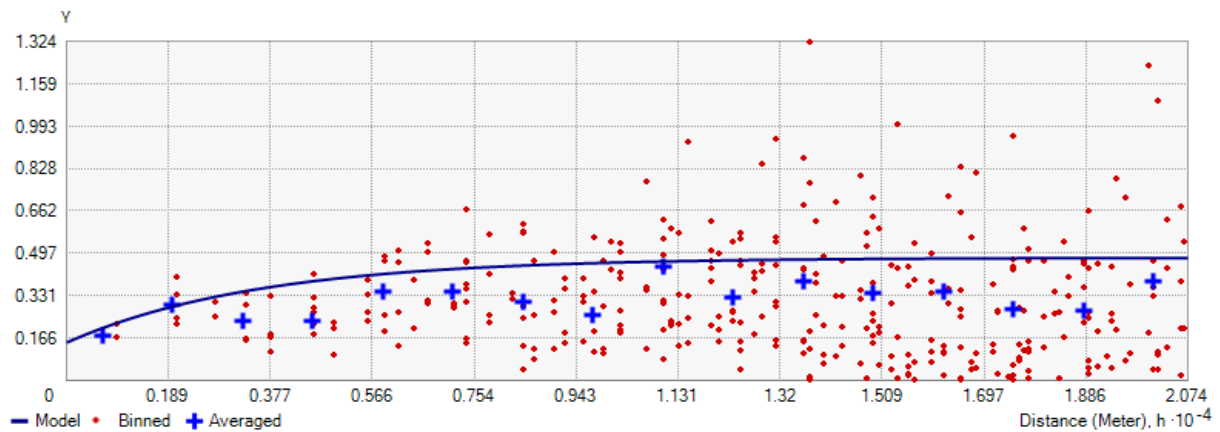


Figure 22. Le variogramme de la première campagne 27 septembre 2011 pour le site marocain

L'axe des abscisses représente les différentes distances séparant des couples de points expérimentaux. Ces distances sont nommées « pas ». En ordonnée sont représentées les valeurs des semi-variances.

Ce variogramme a été calculé avec un pas de 1300 m. Il a été auto ajustée par un modèle exponentiel. L'auto ajustement de ce modèle a été effectuée à l'aide du critère des moindres carrés. La variable CE a été considérée comme isotropique c'est-à-dire qu'il n'y a pas un effet directionnel et que la variable varie de la même manière dans toutes les directions.

Ce variogramme montre d'abord un effet pépité lié soit à l'erreur analytique de mesure de la CE, soit à une variation à très courte échelle.

On remarque que jusqu'à un pas de 7540 m le variogramme est croissant. Les écarts moyens entre les observations augmentent quand la distance séparant ces observations augmente.

Au-delà de 7540 m, le variogramme reste constant quelle que soit la distance. On parle, alors pour cette gamme de distance (>7540 m), de distance d'indépendance spatiale entre les observations. Donc nous pouvons supposer que jusqu'à une distance de 7540 m séparant deux points d'observations, ces couples de points sont liés et que la variable est spatialisable. Dans notre cas, les points d'observations sont espacés de 1300 m d'où la collecte des échantillons est faite à chaque fois qu'il y a un problème de salinité.

Finalement, une carte de salinité pour la première campagne a été élaborée sous ARCGIS (Figure 23).

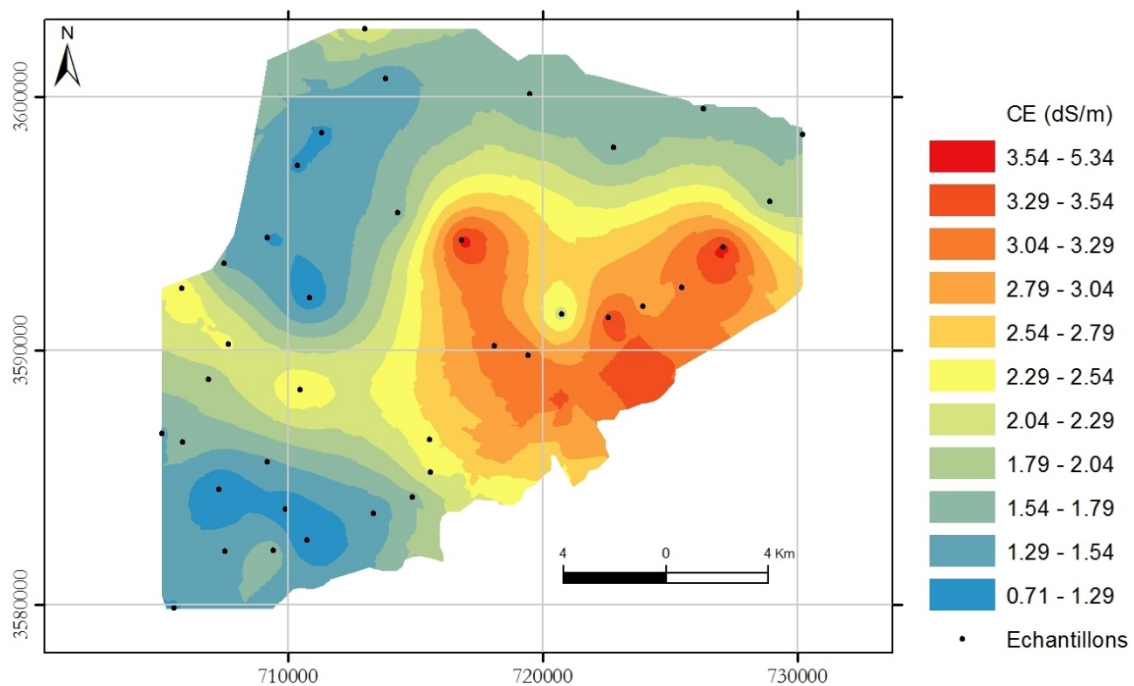


Figure 23. Carte de la salinité de la plaine de Tadla de la première campagne 27 septembre 2011

Les valeurs de la CE varient de 0.71ds/cm à 5.34ds/cm. Durant la première campagne, on constate que la salinité est faible dans la majorité du site d'étude. Sauf que dans quelques zones, où les sols sont moyennement salins.

Carte de la salinité de la deuxième campagne

Le variogramme de la deuxième campagne est illustré dans la Figure 24. Ce variogramme a été calculé avec un pas de 814m. Il a été auto ajustée par un modèle exponentiel. Dans ce cas aussi, la variable CE a été considérée comme isotropique c'est-à-dire qu'il n'y a pas un effet directionnel et que la variable varie de la même manière dans toutes les directions.

Il atteint un palier à 4440m donc la distance d'indépendance spatiale est plus courte que celle fournie par la première campagne. Ceci peut être expliqué par la variation du nombre d'échantillons à cause du changement des conditions physiques de terrain ainsi que par l'augmentation de la valeur de la salinité comme il est indiqué sur la carte (Figure 25). La salinité est de 1.1 ds/m allant jusqu'à 10.4 ds/m.

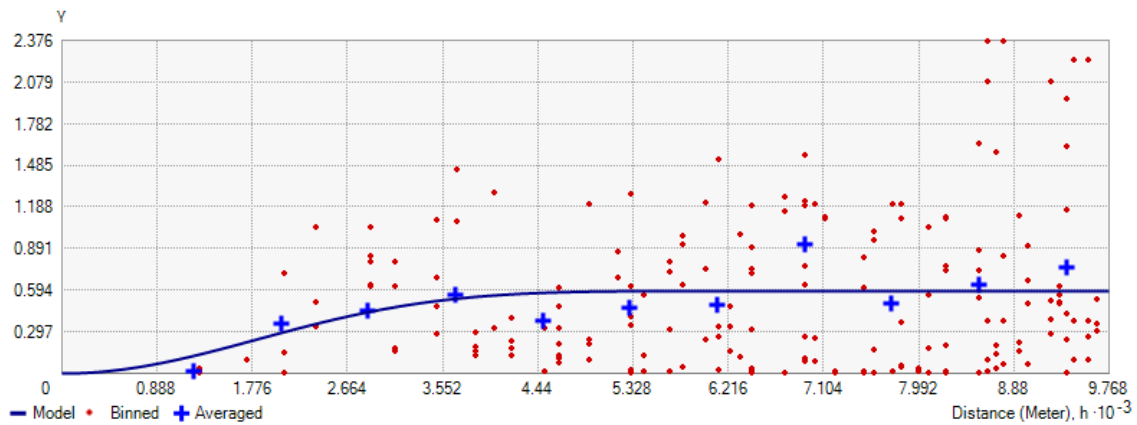


Figure 24. Le variogramme de la deuxième campagne 24 Octobre 2011 pour le site marocain.

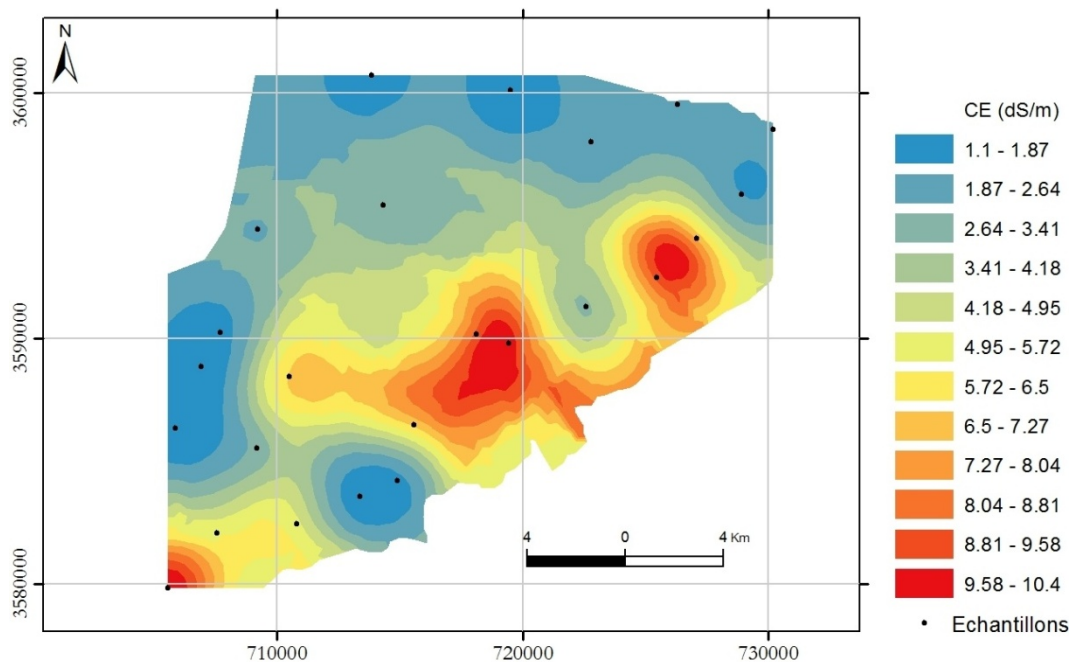


Figure 25. Carte de la salinité de la plaine de Tadla pour la deuxième campagne 24 octobre 2011.

Carte de la salinité de la troisième campagne

Le variogramme de la troisième campagne (Figure 26) a été calculé avec un pas de 2200 m. Il a été auto ajustée par un modèle exponentiel. Dans ce cas aussi, la variable CE a été considérée comme isotropique.

À une distance de 6000 m, le variogramme reste constant quelle que soit la distance. Au-delà de cette distance, la variable n'est plus spatialisable.

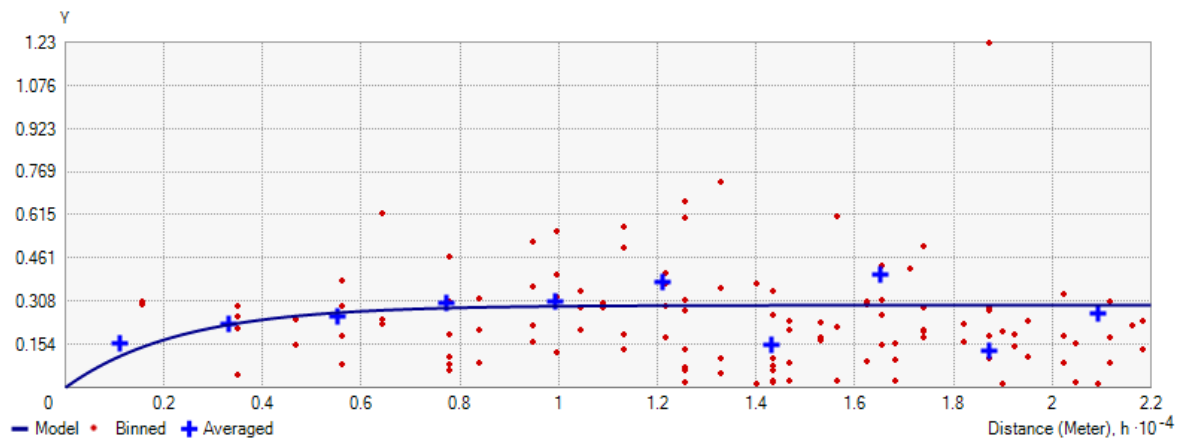


Figure 26. Le variogramme de la troisième campagne 18 novembre 2011

La carte de la salinité (Figure 27) obtenue suite à ce variogramme montre une diminution des valeurs de la salinité due à la pluviométrie enregistrée avant cette campagne qui a engendré une lixiviation des sels.

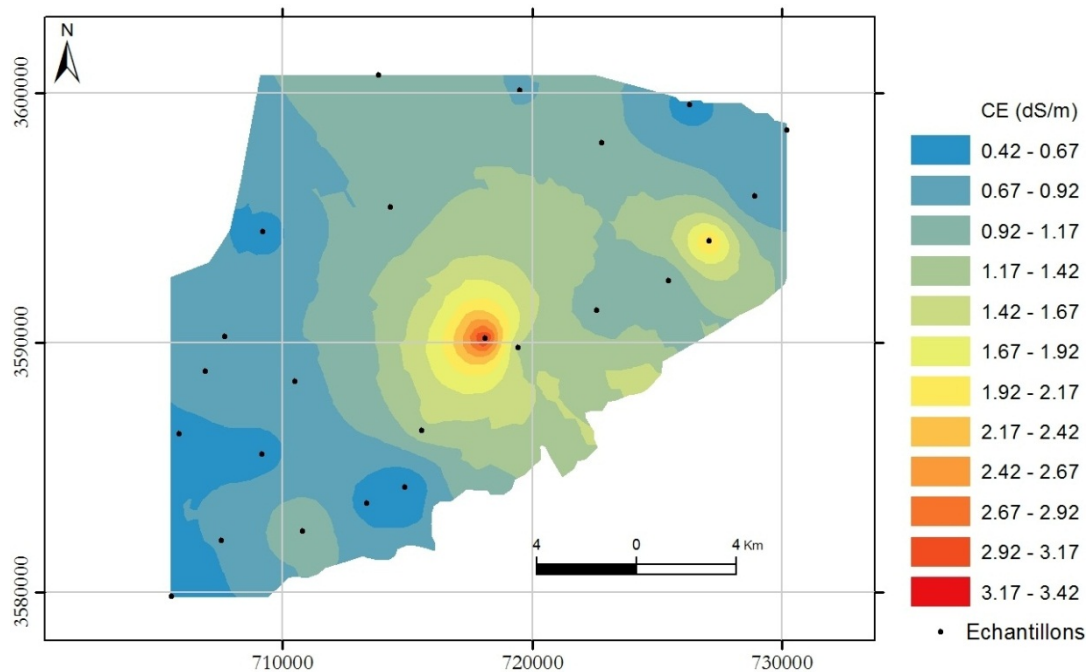


Figure 27. La carte de la salinité de la plaine de Tadla pour la troisième campagne 18 novembre 2011

2.1.5. Les cartes de la variation de la salinité

Après avoir élaboré les cartes de la salinité du site marocain pour les trois campagnes, on a essayé d'élaborer les cartes de la variation de la salinité entre les campagnes 1-2, 2-3 et 1-3 qui vont servir dans le suivi de la salinité du sol.

La carte de la variation de la salinité campagnes 1-2

Dans cette étape, on a soustrait les deux cartes (la carte de la première campagne et la carte de la deuxième campagne) afin d'extraire une carte de variation de la salinité entre les campagnes 1-2 qui intéresse juste des sols nus, pour cela nous avons masqué la végétation pour obtenir le sol nu seulement (Figure 28).

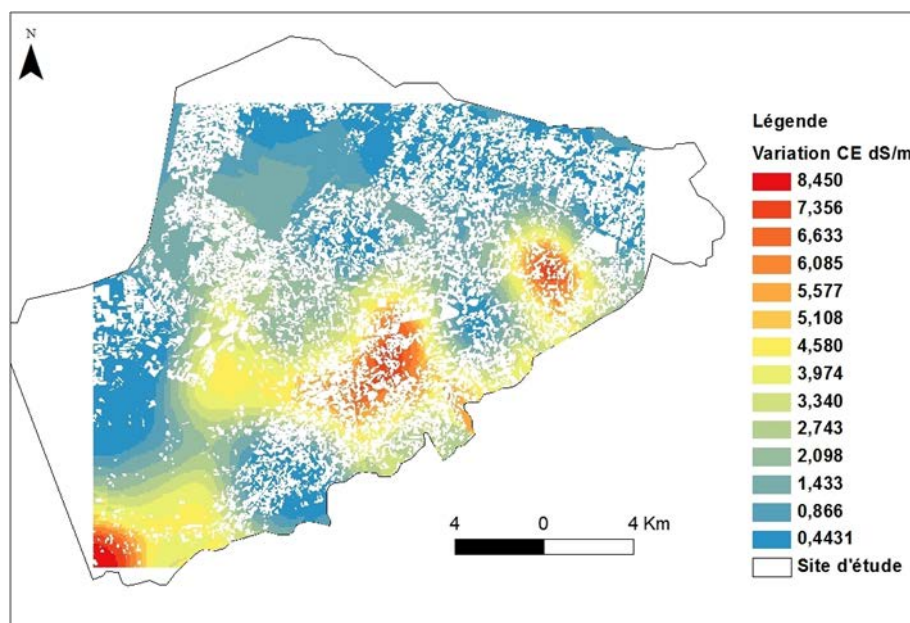


Figure 28. La carte de la variation de la salinité de la plaine de Tadla entre les campagnes 1-2 avec masque de végétation

La carte de la variation de la salinité campagnes 2-3

La carte de la variation de la salinité pour les campagnes 2-3 a été élaborée par la soustraction de la carte de la deuxième campagne et celle de la troisième campagne (Figure 29).

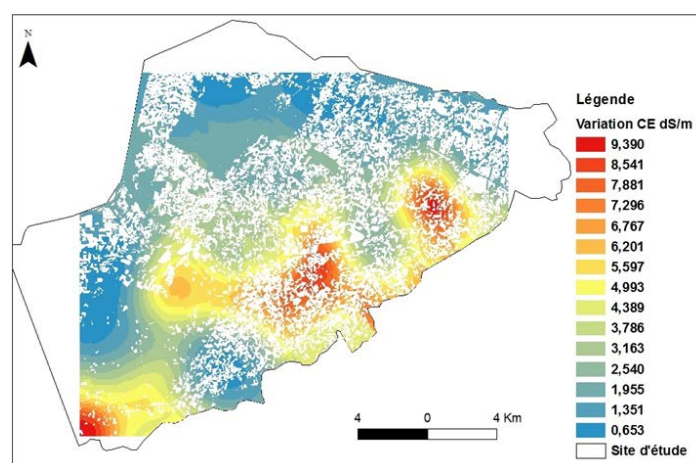


Figure 29. La carte de la variation de la salinité de la plaine de Tadla entre les campagnes 2-3 avec masque de végétation

La carte de la variation de la salinité campagnes 1-3

La carte de la variation de la salinité pour les campagnes 1-3 est la soustraction de la carte de la première campagne et la carte de la deuxième campagne (Figure 30)

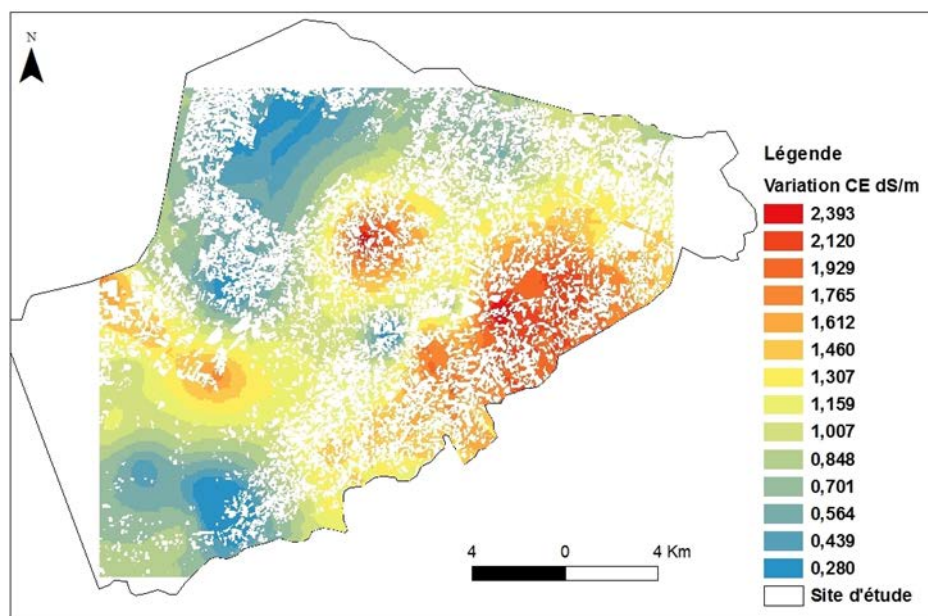


Figure 30. La carte de la variation de la salinité de la plaine de Tadla entre les campagnes 1-3 avec masque de végétation

2.2. Résultats des traitements interférométriques

2.2.1. Site marocain

L'extraction de la valeur de cohérence pour le site marocain a été déterminée suite à une superposition de la carte de la variation de la salinité entre les campagnes 1-2, 2-3 et 1-3 avec les images de cohérence correspondantes (Figure 31).

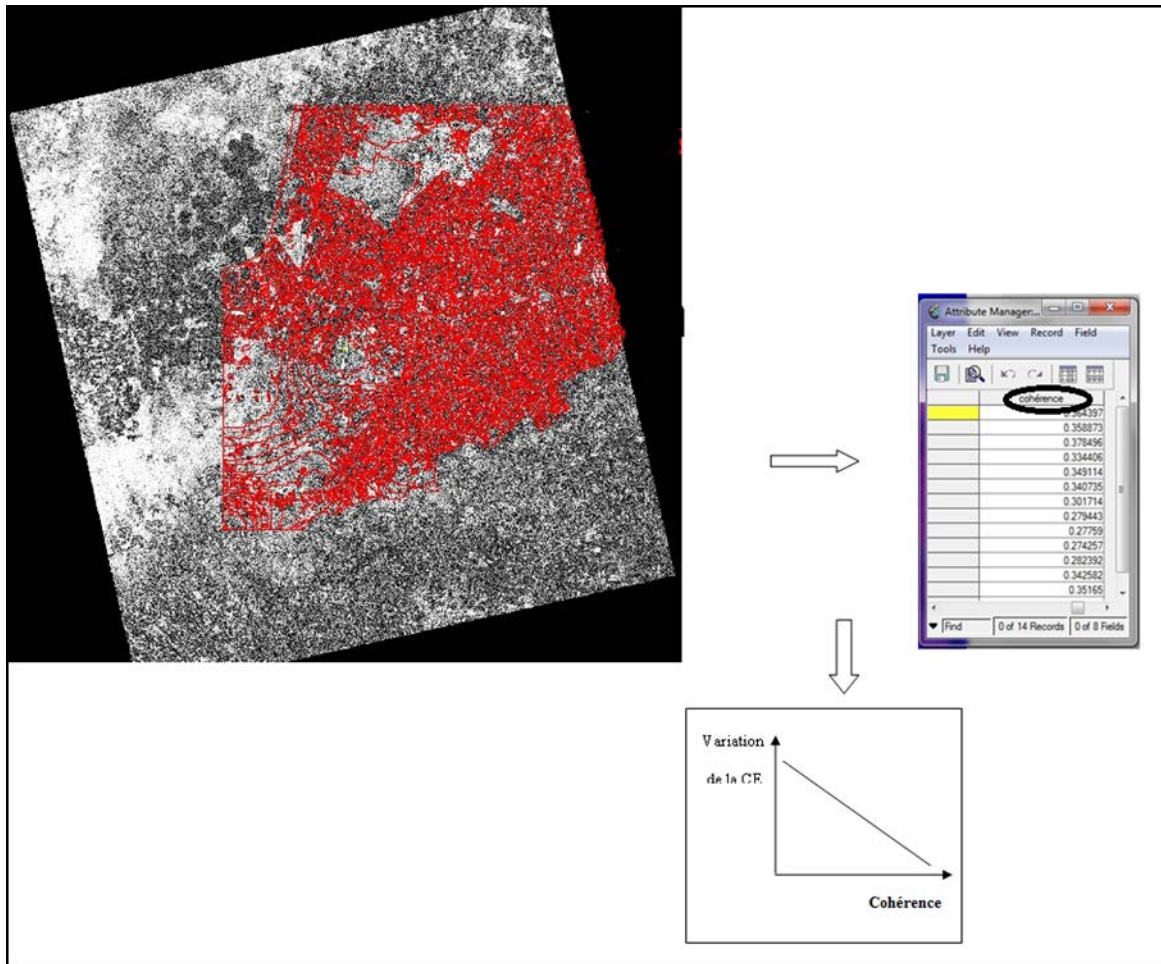


Figure 31. L'extraction de la cohérence de l'image radar.

Suivi de la variation de la salinité du sol des campagnes 1-2

Pour le suivi de la salinité entre les campagnes 1-2, on a utilisé des images de cohérence dans deux différents angles d'incidence, une image avec l'angle d'incidence 28° (27Sep-21Oct) et une image avec un angle d'incidence $44^\circ.4$ (30Sep-24Oct) ainsi que dans différentes polarisations HH, HV et VV. Ceci étant dans l'objectif d'examiner l'impact de ces paramètres sur la corrélation des scènes imagées. Les Figure 32 et Figure 33 présentent les résultats de la variation de la CE et en fonction de la cohérence.

Pour l'angle d'incidence 28° , la corrélation entre la variation de la conductivité électrique et la cohérence interférométrique est quasi nulle, et ceci pour les trois types de polarisation (Figure 32).

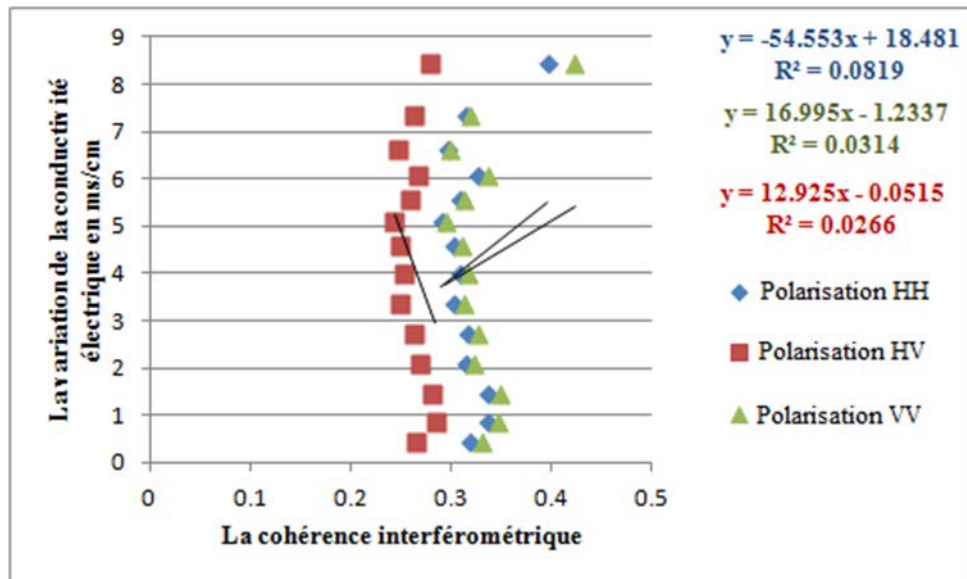


Figure 32. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-2 (27Sep-21Oct) avec un angle d'incidence 28° dans les polarisations HH, HV et VV

Pour l'angle d'incidence 44°.4 et pour les trois types de polarisation, la corrélation est toujours très faible et non significative entre la CE et la cohérence interférométrique (Figure 33).

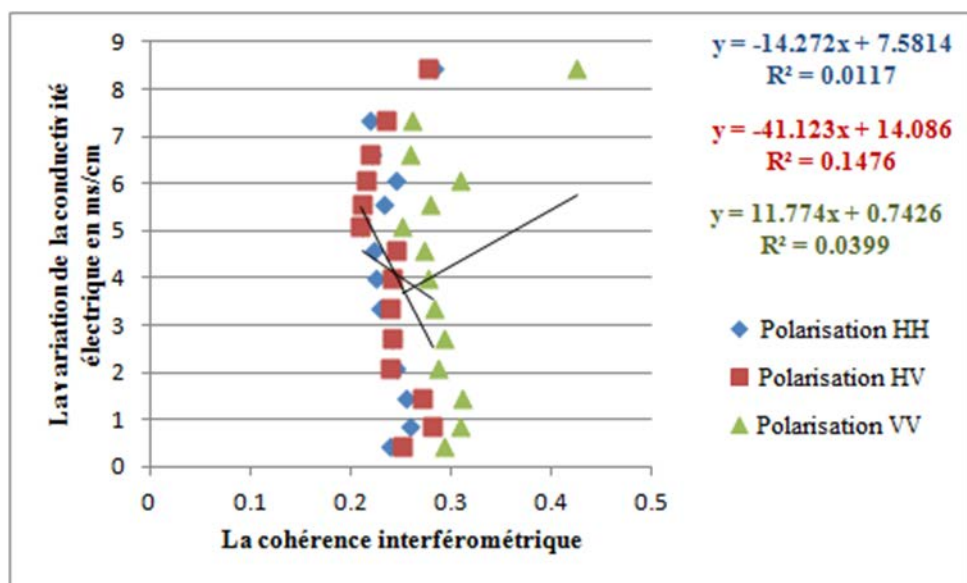


Figure 33. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-2 (30Sep-24Oct) avec un angle d'incidence 44°. 4 pour les polarisations HH, HV et VV

L'allure des courbes des Figure 32 et Figure 33, ainsi que les coefficients de détermination des modèles témoignent que la variation de la conductivité électrique entre les deux campagnes 1 et 2

est indépendante de la cohérence interférométrique. Ce qui explique que la conductivité électrique n'a pas été détectée par le signal radar.

Le faible taux d'humidité dans le sol durant cette période, peut être à l'origine de la non-performance de l'outil radar dans la mesure de la CE. En effet, le constant diélectrique du milieu est le facteur déterminant de l'intensité du signal rétrodiffusé. Pour toutes les fréquences radars, l'humidité correspond à une augmentation de la constante diélectrique donc plus l'humidité du sol est élevée, plus l'effet de la salinité sur la partie imaginaire de la constante diélectrique « ϵ'' » est important, et cela est dû à la solubilité des sels dans l'eau.

Sachant que l'humidité du sol est assurée en grande partie par la pluviométrie. Nous avons pensé à analyser les précipitations enregistrées durant les campagnes du terrain. Figure 34 illustre le diagramme de la pluviométrie correspondant.

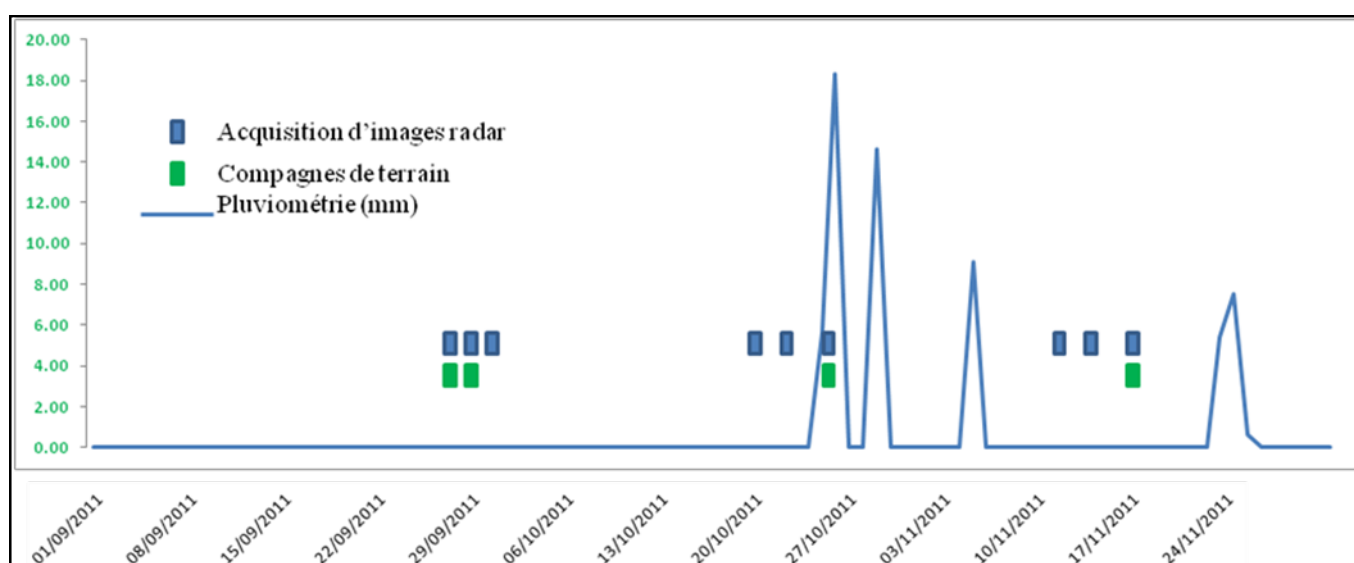


Figure 34. Diagramme récapitulatif de la pluviométrie enregistrée et la date d'acquisition des images et des campagnes de terrain (Site marocain)

L'acquisition des images radars et les mesures du terrain durant la première période coïncident avec des précipitations nulles indiquant une faible humidité du sol, la première pluie enregistrée date du 25 octobre après midi soit quelques heures après l'acquisition de l'image et les prélèvements du terrain de la deuxième campagne.

Pour évaluer la précision des modèles étudiés ci-dessus, une technique de validation croisée a été appliquée. Cette technique consiste à supprimer temporairement une valeur donnée de la CE à partir de l'ensemble de données et à utiliser les observations restantes en tant que groupe d'étalonnage pour estimer la valeur retirée. Cette opération est répétée pour l'ensemble des données.

La performance de chaque modèle a été évaluée à l'aide des indices de performance présentés par le Tableau 5.

Tableau 5. Estimation de la performance des modèles par validation croisée (campagnes 1-2)

Les indices pour l'évaluation du modèle	HH FQ9 (28°)	HV FQ9 (28°)	VV FQ9 (28°)	HH FQ26 (44°.4)	HV FQ26 (44°.4)	VV FQ26 (44°.4)
R²	0.43	0.069	0.38	0.32	0.007	0.35
Nr	-2.41	-0.28	-2.02	-1.05	-0.30	-2.88
RMESr (%)	109	96	100	214	262	86
BIASr	-0.13	-1	-1.02	-1.04	-0.89	-0.98

Tous les modèles ont donné des résultats non significatifs (Tableau 5). En effet, les valeurs de Nash et de R^2 pour les modèles HH, HV, et VV sont assez similaires et indiquent qu'il n'y a pas de correspondance entre les valeurs de la CE observées et celles estimées. De même, les valeurs de RMESr confirment le taux d'erreur élevé. En outre, les biais négatifs indiquent une sous-estimation de la CE.

Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 2-3

Pour le suivi de la salinité entre les campagnes 2-3, on a utilisé des images de cohérence dans deux différents angles d'incidence, 35°.4 (19Oct-21Nov) et 44°.4 (24Oct-17Nov) ainsi que, dans différentes polarisations HH, HV et VV.

Pour l'angle d'incidence 35°.4, la variation de la CE correspond à une variation de la cohérence interférométrique. Cette corrélation est fortement significative pour les polarisations parallèles (HH et VV). Les coefficients de déterminations confirment cette forte corrélation (plus de 80 %) (Figure 35).

Concernant l'angle d'incidence 44°.4, les valeurs de R^2 sont respectivement, pour les polarisations HH, HV et VV, de 28 %, 79 % et 37 %. Cette corrélation entre la CE et la cohérence est démontrée par les modèles de la Figure 36.

Pour l'angle d'incidence 35°. 4, les valeurs de R^2 , RMSEr et de Nash montrent qu'il existe une correspondance entre les valeurs de la CE observées et estimées notamment pour les polarisations parallèles (R^2 de 0.79, RMSEr de 26 % et Nash de 0.7), par contre pour l'angle d'incidence 44°. 4, seulement la polarisation HV montre une analogie entre les valeurs observées et celles estimées selon les valeurs de R^2 (0.74) et de Nash (0.68 %) (Tableau 6).

Le Tableau 6 donne une idée sur la performance des modèles.

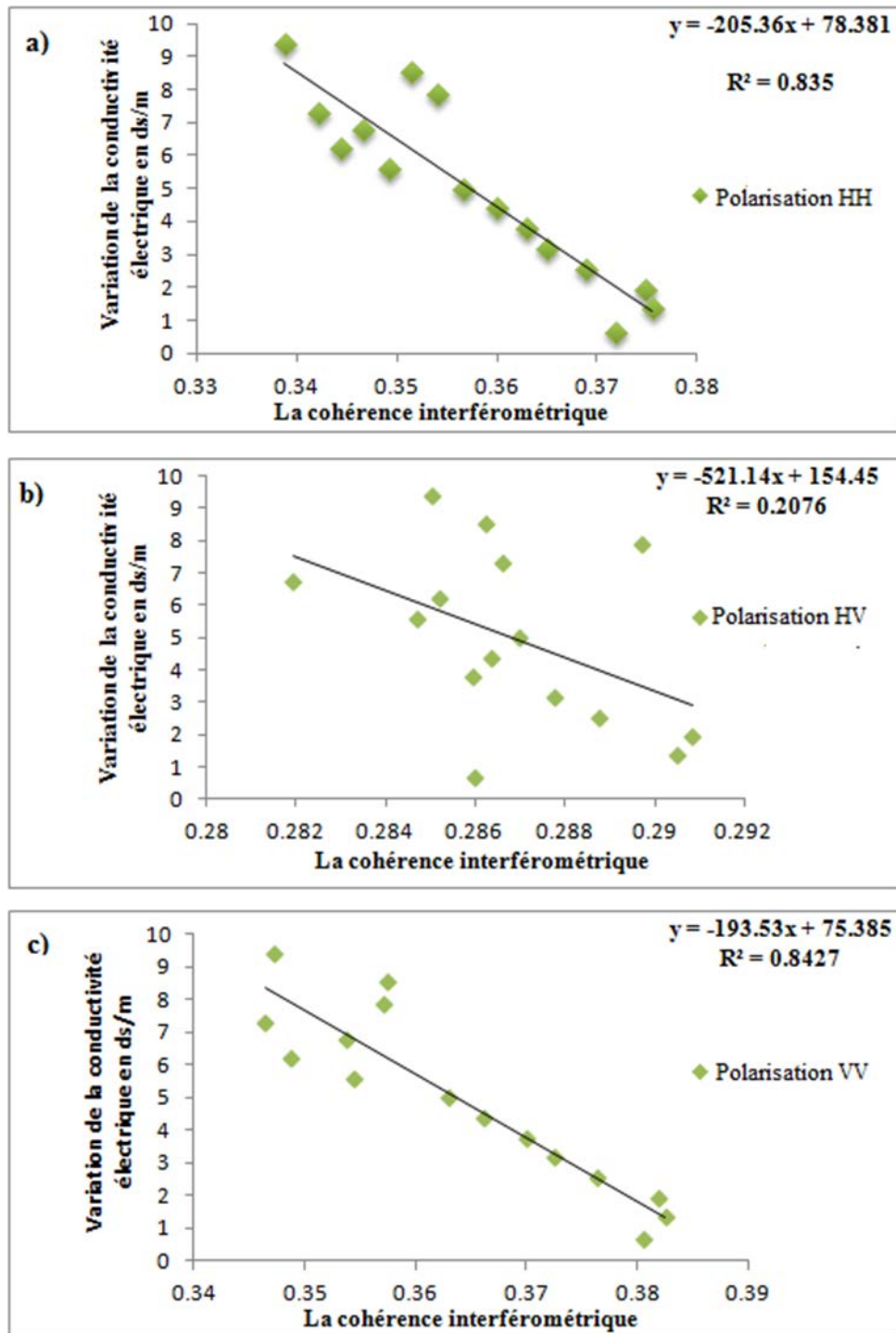


Figure 35. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (19Oct-21Nov) avec un angle d'incidence 35°.4 a) HH b) HV c) VV

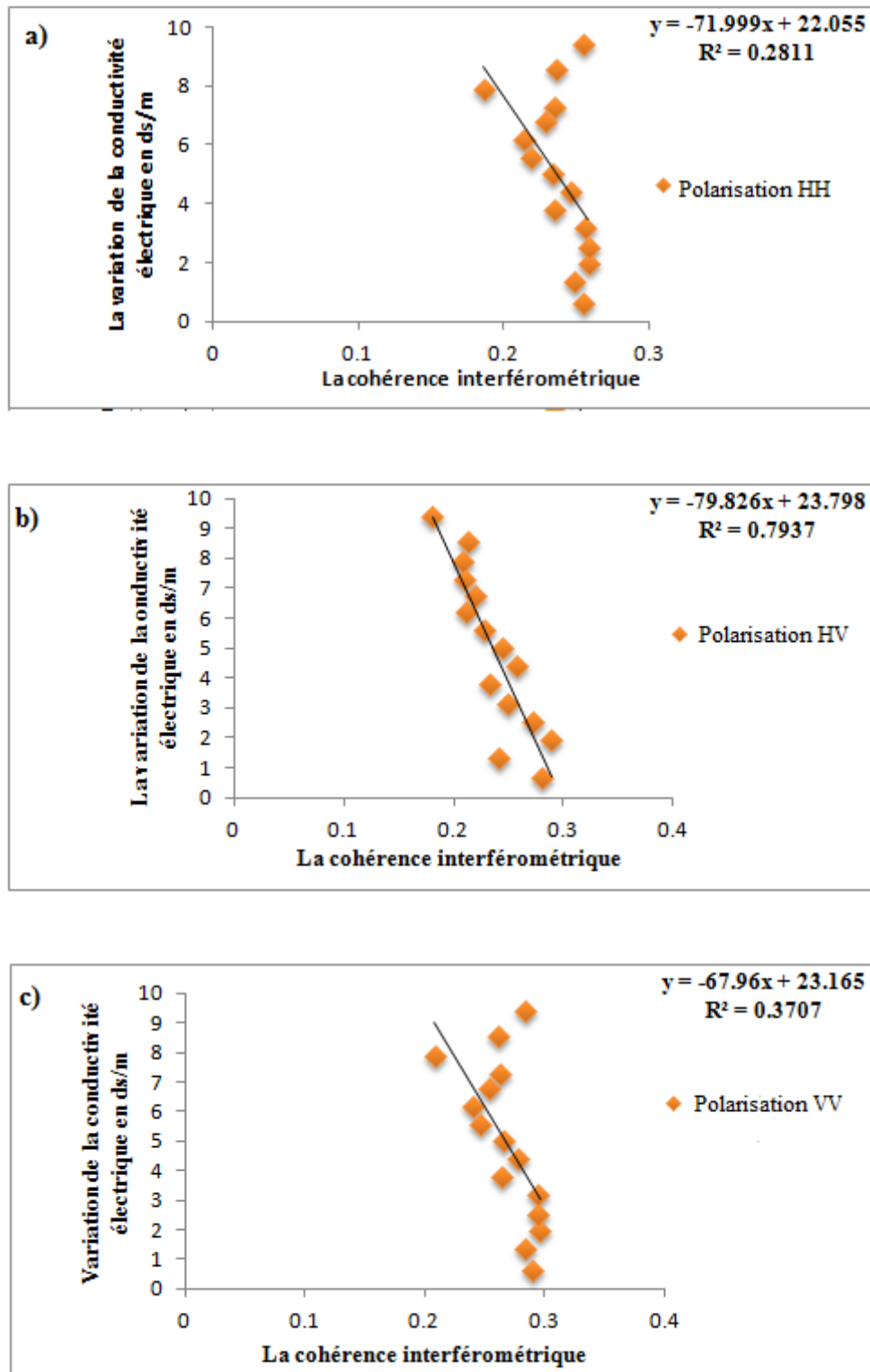


Figure 36. Relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (24Oct-17Nov) avec un angle d'incidence 44°. a) HH b) HV c) VV

**Tableau 6. Détermination de performance du modèle par validation croisée
(Campagnes 2-3)**

Les indices pour l'évaluation du modèle	HH FQ16 (35°. 4)	HV FQ16 (35°.4)	VV FQ16 (35°.4)	HH FQ26 (44°. 4)	HV FQ26 (44°.4)	VV FQ26 (44°.4)
R²	0.79	0.04	0.79	0.13	0.74	0.23
Nr	0.79	-0.01	0.70	-0.20	0.68	-0.05
RMESr (%)	26	70	26.5	68	200	231
BIASr	-0.14	-0.70	-0.14	-1.07	-0.30	-0.90

2.2.2. Site tunisien

Pour le site tunisien, comme on n'a pas pu établir des cartes de salinité, une autre méthodologie a été adoptée. Il s'agit de moyenner la cohérence pour les neuf pixels couvrant les points d'échantillonnage. Cette cohérence a été déterminée par un moyennage d'une fenêtre de 3x3 pixels sous PCI Geomatica (Figure 37).

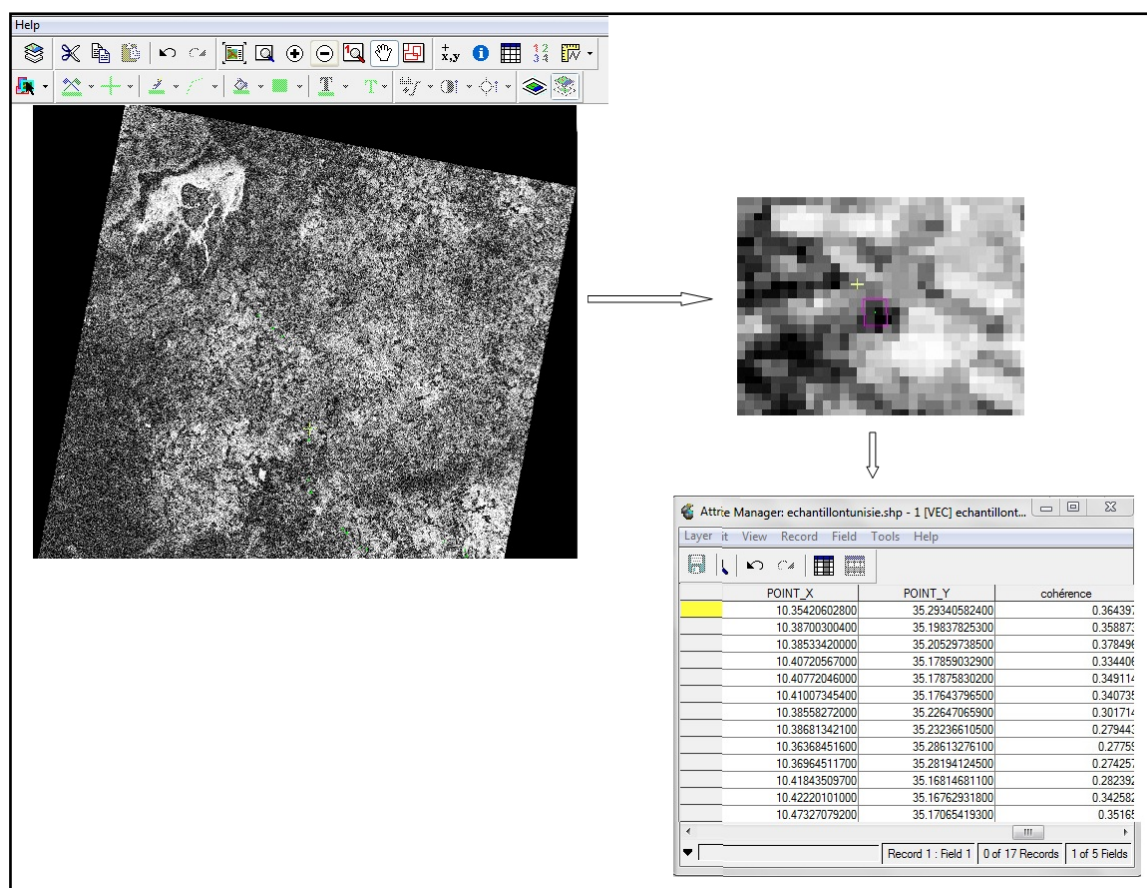


Figure 37. La méthode de la détermination de la cohérence

Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 1-2

Afin de suivre la salinité durant la campagne 1-2, on a utilisé des images de cohérence avec un angle d'incidence 25°. 7 dans les trois polarisations HH, HV et VV. La Figure 38 présente les modèles établis entre la variation de la CE en % et la cohérence.

L'analyse de ces modèles montre que les variations de la CE ne sont pas corrélées avec la cohérence interférométrique. Ceci est expliqué, comme pour le site marocain, par la faible teneur en eau dans le sol. En effet, la pluviométrie enregistrée pour le site tunisien est très faible durant les deux premières campagnes. L'effet de l'humidité est le même pour les deux sites (Figure 39).

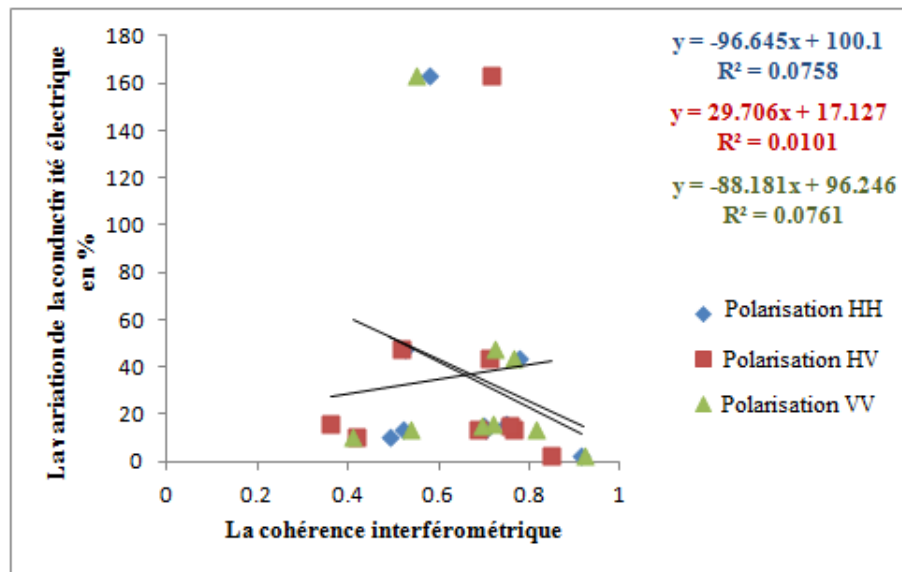


Figure 38. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-2 (27Sep-21Oct) avec un angle d'incidence 25°.7 a) HH b) HV c) VV

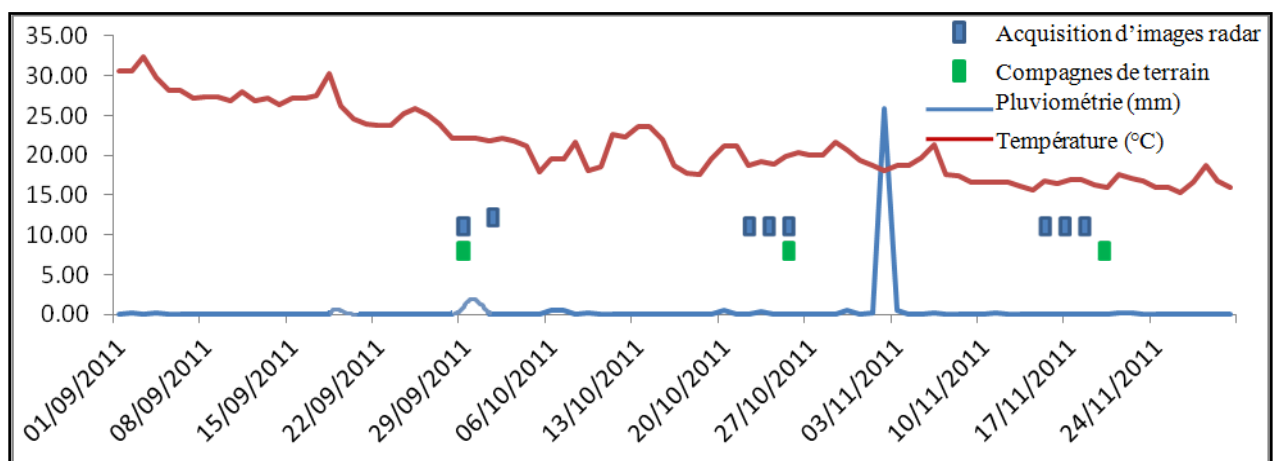


Figure 39. Diagramme récapitulatif la pluviométrie enregistré et la date d'acquisition des images et des campagnes de terrain

L'adoption de la validation croisée confirme l'effet de faible taux d'humidité du sol sur la performance de l'outil radar pour la détection de la salinité du sol. En effet, un R^2 est très faible pour les trois modèles, les valeurs de Nash sont négatives, l'erreur est très élevée et un biais qui montre que les valeurs de la CE sont sous-estimées (Tableau 7).

**Tableau 7. Détermination de la performance du modèle par validation croisée
(campagnes 1-2)**

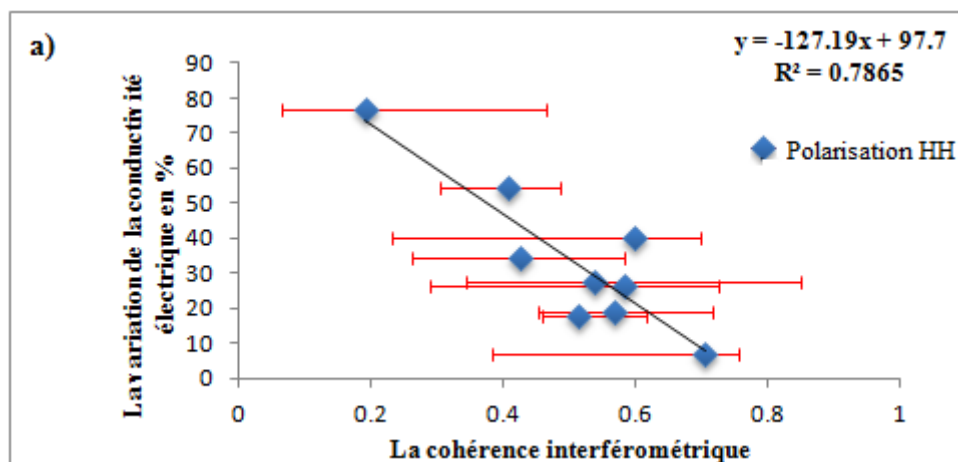
Les indices pour l'évaluation du modèle	HH FQ7 (25°.7)	HV FQ7 (25°.7)	VV FQ7 (25°.7)
R^2	-0.2753	0.1003	-0.759
Nr	-0.35	-0.49	-0.71
RMESr (%)	251	372	305
BIASr (%)	-179	-413	269

Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 2-3

Pour la campagne 2-3, on a utilisé des images de cohérence pour les angles d'incidence 25°.7, 28°.0 et 43°.6 dans les trois polarisations HH, HV et VV. Les Figure 40 et Figure 42 représentent les modèles établis entre la variation de la conductivité électrique en % et la cohérence.

Pour l'angle d'incidence 25°.7, un coefficient de détermination pourrait aller jusqu'à 78 % dans la polarisation HH; il est également acceptable pour HV et VV.

Si le signal radar détecte une variation de l'humidité et/ou la rugosité, la variation de la cohérence sera importante. Toutefois, l'examen de la Figure 42 montre qu'au voisinage de 0,7 la variation de la cohérence est faible et ne dépasse pas 0,1 pour une variation de la CE de 20 %. Par conséquent, cette faible variabilité de la cohérence rejette l'hypothèse d'un effet significatif des variations des facteurs autres que la salinité à savoir l'humidité et la rugosité.



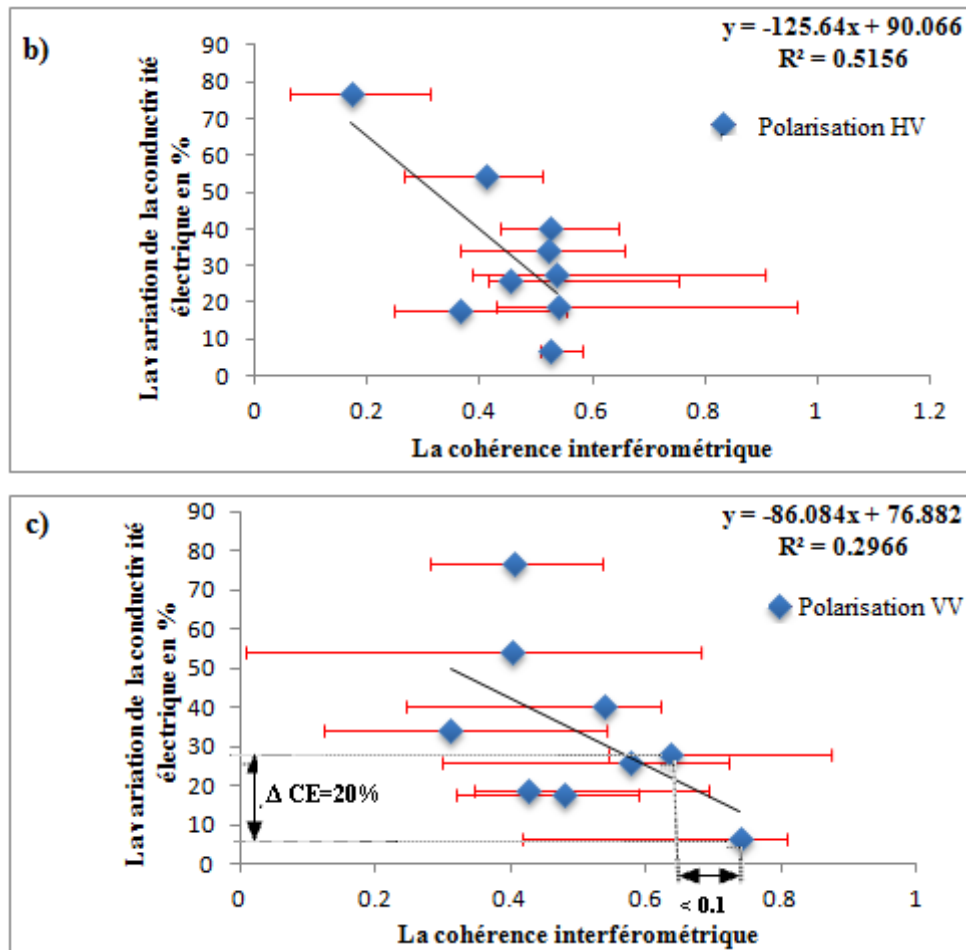


Figure 40. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (21Oct-14Nov) avec un angle d'incidence 25°.7 a) HH b) HV c) VV

Pour confirmer que ce résultat est dû uniquement à la variation de la salinité de surface et non à la variation de l'humidité, nous avons testé le modèle reliant la variation de l'humidité du sol entre les campagnes 2-3 et la cohérence interférométrique pour l'incidence 25°.7.

La Figure 41, montre que la variation de l'humidité n'est pas corrélée avec la cohérence interférométrique ce qui prouve que les variations détectées dans le modèle de la Figure 40 sont seulement les variations de la salinité du sol.

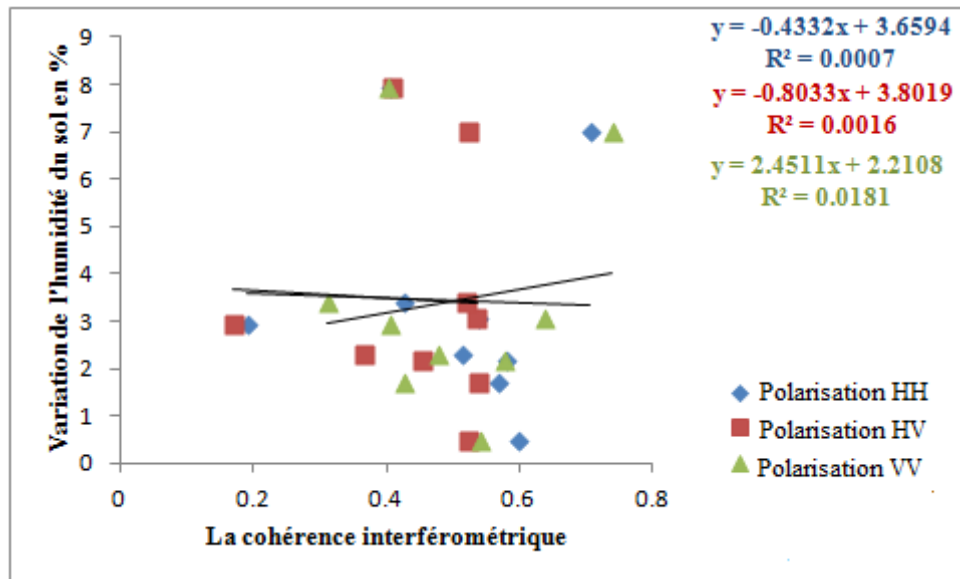


Figure 41. La relation entre la variation de l'humidité du sol et la cohérence pour la campagne 2-3 (21Oct-14Nov) avec un angle d'incidence 25°.7 pour les polarisations HH, HV et VV

Pour l'angle d'incidence 28°.0, le modèle a un coefficient de détermination très faible donc pour cette FQ la cohérence ne peut pas expliquer la variation de la variable CE. Or le changement détecté par l'image radar est expliqué par un autre paramètre biophysique (rugosité, humidité, etc.,...). Ainsi, on peut constater qu'il y a un décalage de quatre jours entre l'acquisition de l'image radar et les campagnes du terrain (les images 20 octobre-13 novembre et le terrain 24 octobre-17 novembre), chose qui peut influencer les résultats.

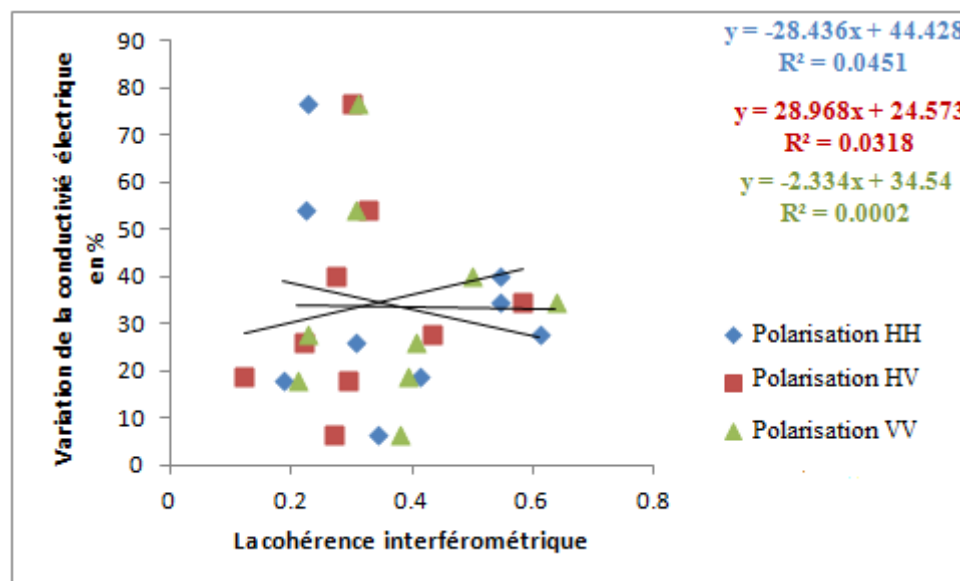


Figure 42. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (20Oct-13Nov) pour l'angle d'incidence 28° HH, HV et VV

Concernant les résultats pour l'angle d'incidence 43°.6, on observe que les modèles sont aussi non significatifs. (Figure 43).

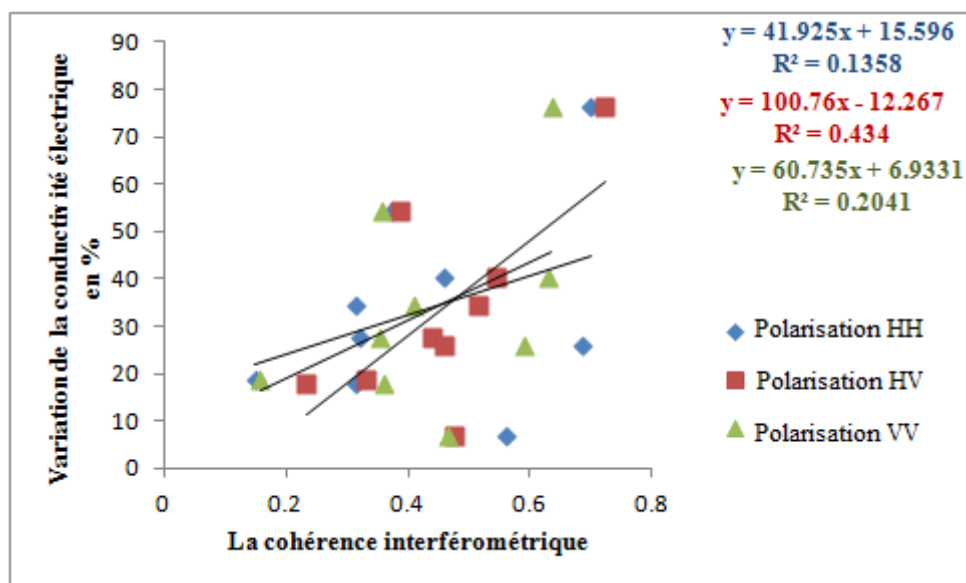


Figure 43. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 2-3 (23Oct-16Nov) pour l'angle d'incidence 43°.6

Le Tableau 8 indique que seulement le premier modèle (angle d'incidence 25°.8 et polarisation HH) est acceptable. La valeur de R^2 est de 0.68, le Nash est de 0.67 et un RMSEr de 48 %, par contre tous les autres modèles possèdent un faible R^2 , une valeur de Nash négative et un RMSEr élevé.

Tableau 8. Détermination de la performance du modèle par validation croisée (campagnes 2-3)

Les indices pour l'évaluation du modèle	HH FQ7 (25°.7)	HV FQ7 (25°.7)	VV FQ7 (25°.7)	HH FQ9 (28°)	HV FQ9 (28°)	VV FQ9 (28°)	HH FQ25 (43°.6)	HV FQ25 (43°.6)	VV FQ25 (43°.6)
R^2	0.68	0.071	0.042	0.31	0.09	0.77	0.16	0.05	0.0007
Nr	0.67	-0.17	-0.11	-0.52	-0.39	-0.40	-0.43	-0.06	-0.18
RMESr (%)	48	65	53	83	79	82	80	94	71
BIASr (%)	-14	-46	-1.52	-69	-73	-70	-67	-46	-53

Suivi de la salinité du sol pour les campagnes 1-3

Comme pour les campagnes 2-3 et 1-2, on a essayé d'établir un modèle reliant la variation de CE et la cohérence entre la première et la troisième campagne. La Figure 44 présente, le modèle de

la calibration et la validation croisée de la campagne 1-3 pour l'angle d'incidence 25°.7 et les polarisations HH, HV et VV.

L'analyse des modèles de la Figure 44, montre que le modèle de la polarisation HH est le plus acceptable il a un coefficient de détermination de 46 %, par contre le modèle HV montre qu'il n'existe pas de relation entre la cohérence et la variation de CE. Cela peut affirmer que les résultats dépendent de la polarisation.

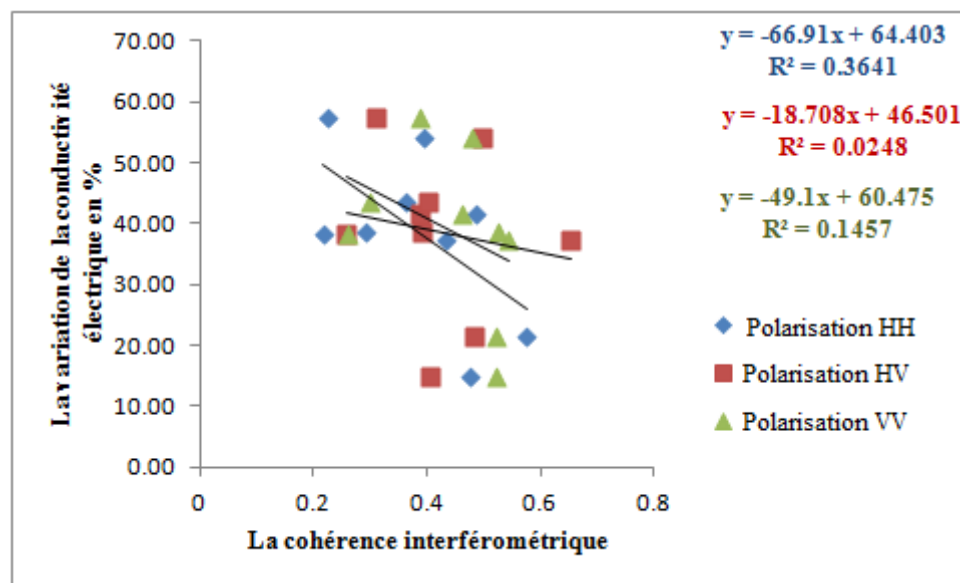


Figure 44. La relation entre la variation de la CE et la cohérence pour la campagne 1-3 (27Sep-14Nov) avec un angle d'incidence 25°.7

Le Tableau 9, issu de la validation croisée du modèle confirme ces résultats et montre que seul le modèle ayant un angle d'incidence 25°.7 et une polarisation HH est acceptable, la valeur de RMSEr est de 36 % et le Nash étant égale à 0.05.

Tableau 9. Détermination de la performance du modèle par validation croisée (campagnes 1-3)

Les indices pour l'évaluation du modèle	HH FQ7 (25°.7)	HV FQ7 (25°.7)	VV FQ7 (25°.7)
R^2	0.08	0.21	0.007
Nr	0.05	-1.06	-0.31
RMESr (%)	36	42	40
BIASr (%)	-13	-12	-19

Les résultats obtenus se récapitulent comme suit :

- Pour le site marocain, l'estimation de la variation de la CE à partir de la cohérence interférométrique est meilleure pour les polarisations HH et VV en mode d'incidence FQ16 ($35^{\circ}.7$). Les valeurs de RMSE sur la CE estimée sont d'environ 26 % et les valeurs de Nash sont de 0.79 et 0.70 pour HH et VV respectivement.

Néanmoins, en mode d'incidence FQ26 ($44^{\circ}.4$), pour la polarisation HH et VV, il n'existe pas de relation entre la variation de la CE et la cohérence interférométrique.

La meilleure CE estimée est pour la polarisation HV (Nash est de 0.68).

- Pour le site tunisien, une bonne corrélation a été obtenue entre la CE estimée et celle mesurée pour le mode d'incidence FQ7 ($25^{\circ}.7$) pour la polarisation HH (un R^2 de 0.68, RMSEr de 48 % et une valeur de Nash de 0.67).

De même, pour la campagne 1-3, le meilleur résultat obtenu est celui de FQ7 de la polarisation HH.

Selon ces résultats, on peut dire que les faibles et les moyennes incidences ($25^{\circ}.7$ et $35^{\circ}.4^{\circ}$) offrent les meilleurs modèles et principalement pour les polarisations parallèles. Pour les fortes incidences, on a constaté que les modèles ne sont pas significatifs et particulièrement pour les polarisations HH et VV. Ce constat est éventuellement dû à la forte influence de la rugosité de surface sur le signal radar. En effet, selon les études de Fung et al (1992) et Baghdadi et al (2002), à forte incidence, le signal radar est plus sensible à la rugosité qu'à l'humidité du sol donc probablement ceci est valable également pour la salinité du sol.

2.3. Résultats des traitements polarimétriques

2.3.1. Développement des modèles d'estimation de la CE et leurs validations

On a utilisé deux techniques de calibration pour développer un modèle d'estimation de la salinité des sols sur le site marocain. Tout d'abord, le modèle est calibré localement dans une fenêtre de taille 7x7 pixels, la seconde technique de calibration est faite en utilisant la segmentation du site basée sur les classes d'interpolation de la CE mesurée in situ. Quant au site tunisien, une estimation par fenêtre de taille 7x7 pixels a été uniquement réalisée. La Figure 45 et la Figure 46 présentent deux exemples de calibration et de validation des modèles dans les deux sites.

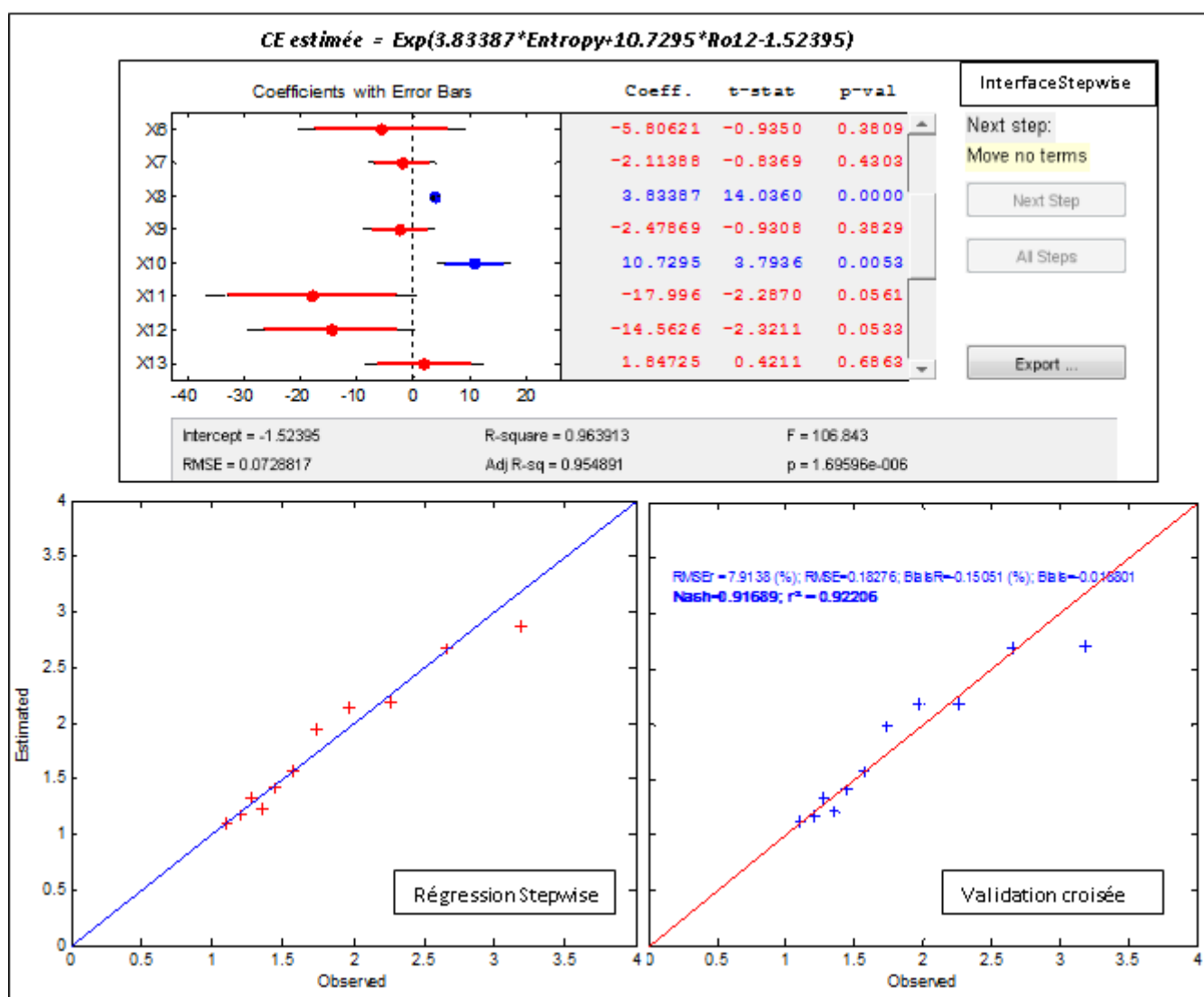


Figure 45 : Calibration par classe d'interpolation et validation du modèle développé pour l'image FQ9 du 27/09/11 sur le site marocain

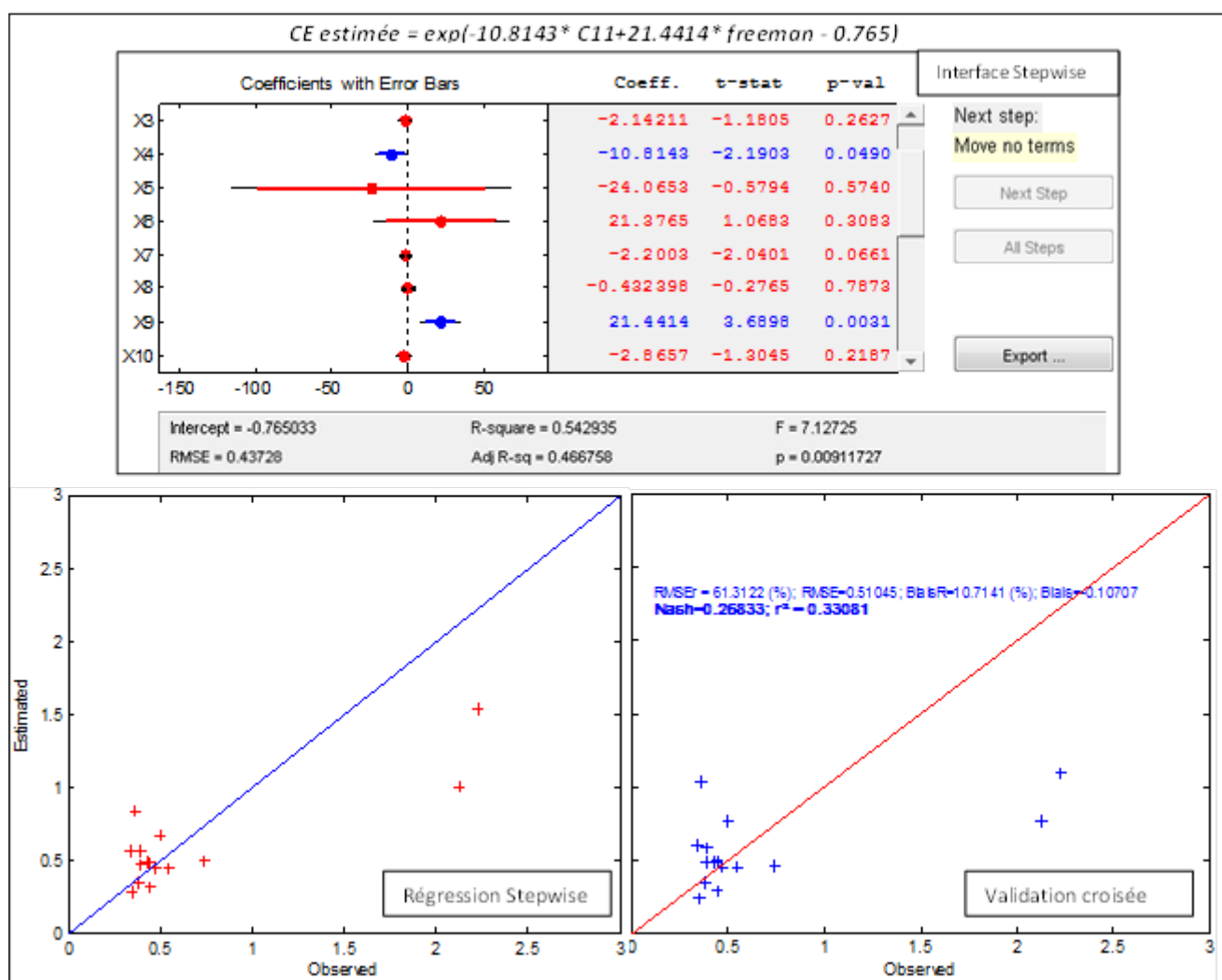


Figure 46 : calibration par fenêtre 7x7 et validation du modèle développé pour l'image FQ9 du 13/11/11 sur le site tunisien

2.3.2. Analyse des résultats obtenus

L'approche de calibration par classe fournit une estimation plus précise que l'approche de calibration par fenêtre de 7x7 pixels. Ceci peut être expliqué par l'incertitude causée par le bruit des images radars qui diminue dans des grandes unités d'estimation. La sensibilité à la salinité du sol a été évaluée pour 20 paramètres polarimétriques cohérents et incohérents. Le

Tableau 10 et le Tableau 11 montrent les meilleurs résultats obtenus. Les modèles d'estimation de CE développés sur les deux sites et leurs validations sont mis en annexe (Annexe C).

Tableau 10 : Paramètres de performance des modèles calculés pour le site marocain (calibration par classe)

Paramètres de performance	FQ9 27sep 2011	FQ26 30sep 2011	FQ22 20oct 2011	FQ16 19oct 2011	FQ9 21oct 2011	FQ16 12nov 2011	FQ9 14nov 2011	FQ26 17nov 2011
---------------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------

R²	0.92	0.89	0.98	0.85	0.67	0.74	0.96	0.81
Nash	0.91	0.89	0.98	0.84	0.66	0.69	0.93	0.79
RMESr (%)	7.90	8.01	3.78	37.97	36.9	29.31	16.5	30.45
BIASr (%)	-0.15	0.06	0.04	7.30	5.20	2.14	-0.08	6.75
Paramètres polarimétriques explicatifs	Entropy Ro12	C11 C22	Ro12 T11	Derd Ro23	Entropy C11	Entropy Ro12	Entropy Ro13	Entropy C22
		Ro12			Derd	C11	Ro23	Serd

**Tableau 11 : Paramètres de performance des modèles calculés pour le site tunisien
(calibration par fenêtre de 7x7)**

Paramètres de performance	FQ7 27sep 2011	FQ29 01oct 2011	FQ9 20oct 2011	FQ7 21oct 2011	FQ25 23oct 2011	FQ9 13nov 2011	FQ7 14nov 2011
R²	0.35	0.30	0.20	0.34	0.16	0.33	0.80
Nash	0.33	0.28	0.16	0.32	0.20	0.26	0.69
RMESr (%)	31.88	30.89	49.93	48.77	46.64	61.31	36.56
BIASr (%)	3.19	4.08	8.18	3.19	9.30	10.71	2.77
Paramètres polarimétriques explicatifs	Entropy Ro12	Ro12	Ro12	Ro23	C22 T22	C11 Freeman	Entropy Anisotropy

À partir de ces résultats, nous avons pu mettre en évidence le potentiel des paramètres polarimétriques extraits à partir des données Radarsat-2 pour l'estimation de la salinité des sols agricoles dans deux contextes différents : un système de production extensive (cultures en sec de l'olivier en Tunisie) où la salinité des sols est de type primaire et un système intensif (cultures irriguées au Maroc) caractérisé par une salinité des sols secondaire. Les résultats obtenus sont concluants, ils indiquent que certains paramètres polarimétriques sont étroitement liés à la salinité des sols observés. En effet, cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes:

- Les données polarimétriques de RADARSAT-2 sont prometteuses pour l'estimation de la salinité des sols.
- La régression multiple pas à pas (stepwise) a permis de trouver les paramètres les plus corrélés à la salinité du sol.
- Certains paramètres polarimétriques ont montré un grand potentiel pour caractériser la salinité du sol à savoir l'entropie H, le coefficient de corrélation Ro12 et C11. En effet, les paramètres Entropy et Ro12 ont présenté une grande sensibilité à la salinité des sols quel que ce soit l'angle d'incidence. Par contre, le paramètre C11 n'est sensible que dans les grands angles d'incidence.
- Le calibrage de la modélisation de la salinité des sols sur la base d'une grande unité d'agrégation donne un modèle plus précis, ce qui est justifié par les bonnes précisions des

modèles développés à partir des classes de salinité contrairement aux modèles issus d'une calibration par fenêtre 7x7pixels.

Conclusion générale

Le présent travail avait comme objectif général de vérifier si la dynamique spatio-temporelle de la salinité des sols peut être détectée par le signal radar ou non. La réponse à cette question a nécessité le passage par plusieurs étapes adaptées à chacun des sites en question au Maroc et en Tunisie.

La première étape a été de voir l'influence de l'humidité et la rugosité sur la réponse radar. Le recours à la modélisation de l'humidité n'a donné aucune corrélation avec la cohérence interférométrique dans le cas du site tunisien, les données d'humidité étant manquantes pour le site marocain.

La détermination de la configuration optimale pour l'estimation de la CE en fonction de la cohérence interférométrique et CE en fonction des paramètres polarimétriques a montré que :

- Au niveau du site marocain, le recours aux techniques géostatistiques a permis l'élaboration des cartes de spatialisation de la salinité des sols en fonction du temps. Cette spatialisation a permis une meilleure modélisation des données (CE) en fonction de la cohérence interférométrique et des paramètres polarimétriques déterminés à partir des différentes acquisitions radars. L'estimation de la variation de la salinité du sol, par cohérence interférométrique, a été optimale à moyennes incidences ($37^{\circ}.4$) dans le cas est ce pour les polarisations HH et VV, alors que la polarisation HV, offre le meilleur résultat pour les fortes incidences, FQ26 ($44^{\circ}.4$). Quant à l'estimation de la salinité du sol par polarimétrie radar, elle était optimale à petites incidences FQ9 (28°), les paramètres Entropy et Ro12 y ont été les plus corrélés, alors que le paramètre C11 était le plus corrélé pour les grandes incidences.
- Dans le cas du site tunisien, la démarche adoptée, était de considérer les données CE des sols, point par point, dans une fenêtre de 3x3 pixels et non sous forme de carte. Ceci nous a permis d'élaborer un modèle permettant d'établir une corrélation reliant la cohérence à la CE. Les résultats ainsi obtenus montrent une estimation optimale de la variation de la salinité pour la polarisation HH et à faibles angles d'incidence ($25^{\circ}.7$).
- Concernant l'interférométrie, les fortes incidences, on a constaté que les modèles n'ont pas donné de satisfaction particulièrement pour les polarisations HH et VV. D'où la variation de la salinité n'est pas détectée.
- En polarimétrie, la décomposition polarimétrique des données RADARSAT-2 est prometteuse dans l'estimation de la salinité des sols. La précision de cette estimation a été améliorée en utilisant une régression multiple stepwise qui a permis de trouver les paramètres polarimétriques les plus sensibles à la salinité du sol.

L'objectif de ce travail étant atteint et a pu donner une idée générale sur le meilleur angle d'incidence et la meilleure polarisation pour la modélisation de la salinité à partir des données RSO. De tels repères pourraient être de grande utilité pour des travaux de recherches ultérieurs, qui se consacraient au suivi du phénomène de la salinisation des sols par la technique interférométrique ou polarimétrique.

Cependant et afin d'affiner les résultats obtenus, plusieurs points doivent être considérés tels que :

- Élargir le maillage des échantillons de sols à étudier. En effet, pour obtenir des meilleures estimations, il est préférable que la taille de l'échantillon soit la plus grande possible.
- Quantifier la rugosité de la surface. Certes, se contenter de décrire cette caractéristique du sol sans la calculer, ne nous permet pas d'atteindre le degré de précision souhaitable.
- Tester, en plus, l'effet « texture du sol » sur l'estimation de la conductivité électrique.
- Exploiter les mêmes configurations d'images radars (mode d'incidence) pour les sites d'études.

Références

- Abedfattah, R., El Mzoughi, A., Zribi, M., Belhadj, Z., 2010.** Interférométrie ROS pour la lutte contre la désertification dans le sud Tunisien. Xièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF.109-111
- Al awaji, M.H., Heakal, M.S., Al asheikh, A., Reda, M., 1991.** Distribution and composition of salts in sand dunes overlying salt flats of coastal desert, Saudi Arabia. *Geoderma* 54, 125-136.
- Aly, Z., Bonn, F., Magagi, R., 2004.** Modeling the backscattering coefficient of salt affected soils: Application to Wadi el Natrun Bottom, Egypt . *EARSeL eProceeding* 3.p 372-381.
- Amari, A., Bedir, M., 1989.** Les bassins quaternaires du Sahel central de la Tunisie. Genèse et évolution des sebkhas en contexte décrochant compressif et distensif. *Centre des sciences de la terre. INRST*, 49-56.
- Antipolis, S., 2003.** Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens. *Plan bleu*. 80 pages.
- Arbol, I.P., Yadav, J.S.P., Massoud, F.I., 1988.** Salt affected soils and their management. In: 39, F.s.b. (Ed.), Rome.
- Arnaud, M., Emery, X., 2000.** Estimation et interpolation spatiales: méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Paris. 221 pages
- Askri, B., Bouhlila, R., 2010.** Évolution de la salinité dans une oasis moderne de la Tunisie. *Étude et gestion des sols* 17, 197-212.
- ASTRIUM, 2012.** L'interférométrie radar à synthèse d'ouverture.
- Badraoui, M. and Stitou, M., 2003.** Status of Soil Survey and Soil Information System in Morocco. *Options Méditerranéennes, Série B, No 34*, pp. 197.
- Badraoui, M., 2003.** Présentation succincte du Tadla.
- Badraoui, M., Merzouk, A., Bonn, F., Gwyn, Q.H.J et Hinse, M., 1989.** Apport de la télédétection à la cartographie des sols dans les zones arides et semi-arides. *IAV Hassan-II / Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada*, 132 pages.
- Badraoui, M., 2003.** Élaboration d'un modèle d'écobilan pour l'évaluation environnementale de l'agriculture irriguée au Maroc Cas du périmètre irrigué de Tadla.
- Bagdadi N., Gaultier S. et King C., 2002.** Retrieving surface roughness and soil moisture from SAR data using neural networks. *Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*. p. 315 - 319
- Bannari, A., Guedon, A. M., El-Harti, A., Cherkaoui, F. Z. and El-Ghmari, A., 2008.** Characterization of Slightly and Moderately Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land using Simulated Data of Advanced Land Imaging (EO-1) Sensor, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*,39:19,2795-2811.
- Bellouti, A., Cherkaoui, F., Benhida, M., Debbarh, A., Soudib, B., Badraoui, M., 2002.** Mise en place d'un système de suivi et de surveillance de la qualité des eaux souterraines et des sols dans le périmètre irrigué du Tadla, au Maroc., Montpellier, France.
- Bonnet, E., 2004.** Photographie aérienne.
- CA, 2002.** La carte agricole numérique de la Tunisie. Ministère de l'Environnement, Tunisie.
- CCT, 2008.** Centre canadien de Télédétection.

- Chahbi, A.**, 2010., Analyse et estimation de l'état hydrique et de la salinité du sol sur la plaine de Kairouan par télédétection radar. Mémoire de master. Institut national agronomique de la Tunisie. 65p.
- Chikhaoui, M., Merzouk, A., Lacaze, B., Madramootoo, C.**, 2010. Étude de la dégradation des sols en milieu semi-aride à l'aide de l'approche neuronale et de données multi sources. *Revue télédétection* 9, 139-150.
- Cloude, S. R., & Pottier, E.**, 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 498–518.
- Debbarh, A., Hammani, A.**, 1991. Étude de l'impact de l'irrigation sur l'environnement cas du périmètre du Tadla. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. p 14.
- Demontoux, F. Le crom, B. Ruffié, G. Wigneron, J.P. Grant, J.P. Heather Lawrence F.**, 2007., Étude d'un modèle d'inversion liant l'émissivité à l'humidité des sols. Contribution à la mise au point de l'algorithme de la mission SMOS. Journées Franco-Maghrebines des Micro-ondes et de leurs Applications, Fes : Maroc (2007).
- Eckhardt, D.W., Verdin, J.P. and Lyford, G.R.**, 1990. Automated Update of an Irrigated Lands GIS Using SPOT HRV Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59 (11): 1515-1522.
- Fakhi, S., Aadjour, M., Fedan, B., Andres, Y., Abbe, J., Bandombele, M., Morabet, A., El Morabet, A.**, 2002. Analyse géochimique par spectrométrie gamma et par fluorescence X (EXDRF) des dépôts mésozoïques des forages OYB-1 et NDK-2 (bassins de Doukkala et d'Essaouira, Maroc). *Bulletin de l'institut scientifique, Rabat section science de la terre* 24, 59-69.
- FAO**, 2002. Le sel de la terre: un danger pour la production vivrière. Sommet mondial de l'alimentation.
- Farifteh, J.**, 2007. Imaging spectroscopy of salt-affected soils: Model-based integrated method. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC) and Utrecht University. 207pages
- Ferro-Famil, L., Pottier, E., & Lee, J. S.**, 2001. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/ α -Wishart classifier. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 2332–2342.
- Fung A. K., Li Z. et Chen, K. S.** 1992. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 30, pp 356-369.
- Gascuel-odeux, Walter, Voltz**, 1993. Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiales. *Science du sol* 31, 4, 193-213.
- Gauthier, J.**, 2010. La planification des interventions en milieu naturel à l'aide des outils de la photo-interprétation 102p.
- Girard, M.C., Girard, C.M.**, 1999. Traitement de données de télédétection. environnement et ressources naturelles. 2e édition. 576pages.
- Grissa, M., Abdelfattah, R., Mercier, G., Zribi, M., Chahbi, A., Lili-Chaabane, Z.**, 2011. Empirical model for soil salinity mapping from SAR data IEE. 1099-1102.
- Hamza, A.**, 1978. La salinisation secondaire en Tunisie. *Sols de la Tunisie* 20. 105 pages.
- Hasni, K., Benali, H., Said, T.**, 2009. Génération d'un Modèle numérique de Terrain Radar : Application à la région d'Oran, Algérie. *BULLETIN des Sciences Géographiques* 23.
- Hchicha, M.**, 2007. Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. *Sécheresse* 18, 45-50pp.

- Hchicha, M., Job, J.**, 1994. Suivi de la salure des périmètres irrigués de Tunisie par conductiviométrie électromagnétique. ORSTOM.
- Herrero, J., Pérez-Coveta, O.**, 2005. Soil salinity changes over 24 years in a Mediterranean irrigated district. *Geoderma* 125, 287-308pp.
- Holah, N.**, 2005. Potentiel des nouveaux capteurs radar multipolarisation et polarimétrique pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole. Thèse présentée à l'université d'Orléans p. 247.
- Houcine, F., Hadoud, A., belhadj-aissa, M., Fekir, M., Belhadj-aissa, A.**, 2009. Méthode de déroulement de phase interférométrique : étude comparative et application. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. 6p.
- Hulme, M., Conway, D., Jones, P.D., Jiang, T., Barrow, E.M. and Turney, C.** 1995., *Climatology for Europe for Climate Change Modelling and Impact applications. International Journal of Climatology*, Vol. 15, 1333-1363.
- IPTRID-FAO**, 2006. Conférence électronique sur la salinisation : Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation., FAO, Février-Mars 2006.
- IRD**, 2008. Les sols, des milieux vivants très fragiles. SUDS en ligne.
- Jenson, J.**, 2007. Remote Sensing of the environnement, an earth resource perspective. 2ème édition. 591 pages.
- Job, J., Barrios, J., Gonzales, M.**, 1997. Détermination précise de la salinité des sols par conductivimétrie électromagnétique. CENID RASPA/ORSTOM, Programme de recherche sur la dynamique des sels dans la Comarca Lagunera, A.P. 225-3, Z.I 35071, Gomez Palacio, Dgo, Mexique.
- Job, J., Mohdi, M., Hachicha, M.**, 1986. Suivi de l'évolution de la salinité des terres dans le périmètre irrigué de Sidi Saad (Kairounnais). ORSTOM. 11p.
- Karim, L.H., Debbouche, C., Soudi, B.**, 2004. L'approche de l'écobilan dans l'évaluation environnementale de l'agriculture irriguée en zones méditerranéennes. Étude de cas dans le périmètre du Tadla, au Maroc. Projet INCO-WADEMED Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture irriguée.
- Krause, P., Boyle, D.P., Bâse, F.**, 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5, 89-97.
- Kurtzman, D., Kadmon, R.**, 1999. Mapping of Temperature Variables in Israel : Comparison of Different Interpolation Methods. *Climate. Research* Vol. 13, 33-43pp.
- Lee, J. S., & Pottier, E.**, 2009. Polarimetric radar imaging from basics to applications. New York: CRC Press.
- Lee, J. S., Grunes, M. R., & de Grandi, G.**, 1999. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 2363–2373.
- Legros J. P.**, 2009. La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier conférence n° 4069, Bull. n° 40, pp. 257-269.
- Loukili, M., Bock, L., Engels, P., Mathieu, L.**, 1999. Approche géomorpho- pédologique et système d'information géographique pour la gestion des terres au Maroc. . *Étude et Gestion des Sols* Vol. 7, 37-52.
- Maitre, H.**, 2001. Processing of Synthetic Aperture Radar Images. USA. 378 pages.
- Massoni, C., Missan, G., Beaudetm, G., Combesh, E., Lonesco, P.**, 1970. La plaine de Tadla : chapitre II. Publications de l'ORSTOM. Cahier de la recherche agronomique, 163-194.
- Meguelati, S.**, 2009. le principe du radar. Université de Blida, faculté des sciences de l'ingénieur.

- Mermoud, A.**, 2006. maîtrise de la salinité du sol. École polytechnique de Lausanne.
- Metternicht, G., Zinck, J.**, 2002. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. Remote Sensing of Environment Volume 85, Issue 1, 25 April 2003, pp1 –20
- Metternicht, G.I.**, 1998. Fuzzy classification of JERS-1 SAR data: an evaluation of its performance for soil salinity mapping. Ecological Modelling 111, 61-74.
- Mhiri, A., Tarhouni, J., Hchicha, M., Lebdi, F.**, 1998. Étude et gestion des sols 5, 257-268.
- Ministère de l'Environnement**, 2010. Système d'information sur la lutte contre la désertification, Tunisie.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bringer, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L.**, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. American Society of Agricultural and Biological Engineers 50, 885-900.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V.**, 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principals. Journal of hydrology 10, 282-290.
- ORMVAT**, 2004. Monographie du périmètre de Tadla.
- Paloscia, S., Pampaloni, Pettinato, P.S. et Santi, E.**, 2010., Generation of soil moisture maps from ENVISAT/ASAR images in mountainous areas: a case study. International Journal of Remote Sensing Vol. 31, No 9, pp 2265–2276.
- Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., Vidal, J., Sánchez, A.**, 2003. The role of low-quality irrigation water in the desertification of semi-arid zones in Murcia, SE Spain. Geoderma 113, 109-125.
- Petit, M., Stretí'a, J., Farrugio, H., Wadsworth, A.**, 1990. Potentialités du radar SAR en halieutique Application à la pêche thonier de surface et à la pêche artisanale. ORSTOM.
- Pitman, M., Läuchli, A.**, 2004. Global Impact of Salinity and Agricultural Ecosystems Salinity: Environment - Plants - Molecules. In: Läuchli, A., Lüttge, U. (Eds.). Springer Netherlands, pp. 3-20.
- Qadir, M., Ghafoor, A., Murtaza, G.**, 2000. Amelioration strategies for saline soils: a review. Land Degradation & Development 11, 501-521.
- Richards, J.A.**, 2009. Remote sensing with imaging radar. Germany. Springer series on signal and communication technology. 352pages.
- Ruellan, A., Blanchart, É., Brauman, A., Grimaldi, M., Grünberger, O., Barbiero, L., Chaplot, V., Olivier, M., Bernoux, M.** 2008. Les sols, des milieux vivants très fragiles, les dossiers thématiques de l'IRD. 21pages
- Sahraoui, H.**, 2005. Principe du Radar à Synthèse d'Ouverture RSO et Simulation d'une chaîne d'acquisition d'image Radar. 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications.
- Servant, J.**, 1975. La salinité dans le sol et les eaux : Caractérisation et problèmes d'irrigation-drainage., INRA, Montpellier.
- Shao, Y., Hu, Q., Guo, H., Lu, Y., Dong, Q., Han, C.**, 2003. Effect of dielectric proprieties of moist salinized soils on backscattering coefficients extracted from radarsat image. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing 41, 1879-1888.
- Slade, B.**, 2011. Radarsat-2 Product Description. MDA.
- SOCO**, 2009. l'agriculture durable et la conservation des sols : processus de dégradation des sols.

- Sonmez, S., Buyuktas, D., Okturen, F., Citak, S.,** 2008. Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. *Geoderma* 144, 361-369.
- Spies, B., Woodgate, P.,** 2004. Salinity mapping methods in the Australian context. . Department of the environment and heritage ;agriculture, fisheries and forestry edition.229pages.
- Ulaby F.T., Allen C.T. et Eger G.,** 1984. Relating the microwave backscattering coefficient to Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*: 14 pp 113-133.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K.,** 1986. Microwave remote sensing, active and passive: radar remote sensing and surface scattering and emission theory.
- Wang J.R. et Schmugge T. J.,** octobre 1978. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content. NASA, technical memorandum. 18 pages.
- Weng, Y., Gong, P., Zhu, Z.,** 2008. Reflectance spectroscopy for the assessment of soil salt content in soils of the Yellow River Delta of China. *International Journal of Remote Sensing* 29, 5511-5531.
- Zheng, Z., Zhang, F., Ma, F., Chai, X., Zhu, Z., Shi, J., Zhang, S.,** 2009. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field. *Geoderma* 149, 243-248.
- Zribi, M.,** 1998. Développement de nouvelles méthodes de modélisation de la rugosité pour la rétrodiffusion hyperfréquence de la surface du sol., télédétection : traitement du signal.Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Zribi, M., Le Morvan A. et Baghdadi N.,** 2008. Dielectric Constant Modelling with Soil-Air Composition and Its Effect on SAR Radar Signal Backscattered over Soil Surface. *Sensors* : (8) pp 6810-6824.

Annexe A : Observation du sol

Les observations du sol pour le site tunisien

EC (mS/cm)			Échantillons	Changement du couvert végétal			Changement d'humidité			Changement de rugosité		
Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	N° terrain	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	campagne 1	campagne 2	campagne 3	Campagne 1	Campagne 2	campagne 3
0.78	0.82	0.45	1	Olivier	Olivier	Olivier	0	1	1	2	2	2
226.33	190.17	177.43	2	nu	Nu	Nu	1	1	2	0	0	0
0.88	1.01	0.75	3	nu	Nu	Nu	0	1	0	1	1	1
1.51	0.70	23.72	4	nu	nu	Nu	1	1	1	2	3	3
0.80	0.69	0.50	5	nu	nu	Nu	0	1	1	0	0	0
0.67	0.66	0.39	6	Olivier	Olivier	Olivier	0	1	1	0	0	0
0.68	0.59	0.39	7	nu	nu	Nu	0	1	1	3	3	3
0.93	0.70	0.47	8	nu	herbe	Herbe	0	1	1	0	3	3
0.76	0.43	0.35	9	nu	nu	Nu	1	1	1	0	0	0
0.83	1.29	0.34	10	nu	herbe	Herbe	1	2	1	0	3	3
0.71	1.37	0.36	11	nu	herbe	Herbe	0	1	1	0	3	3
0.64	1.68	0.39	12	nu	nu	Nu	0	2	1	0	0	0
1.92	0.46	0.55	13	nu	herbe	Herbe	1	1	1	1	1	1
1.01	0.53	0.43	14	nu	nu	Nu	0	1	1	0	0	0
1.54	1.38	2.13	15	nu	nu	Nu	0	1	2	3	3	3
0.60	0.56	0.45	16	nu	nu	Nu	0	0	1	0	3	3
1.82	1.87	2.23	17	nu	herbe	Herbe	1	1	2	0	3	2

0. Nulle

1. Faiblement

2. Moyennement

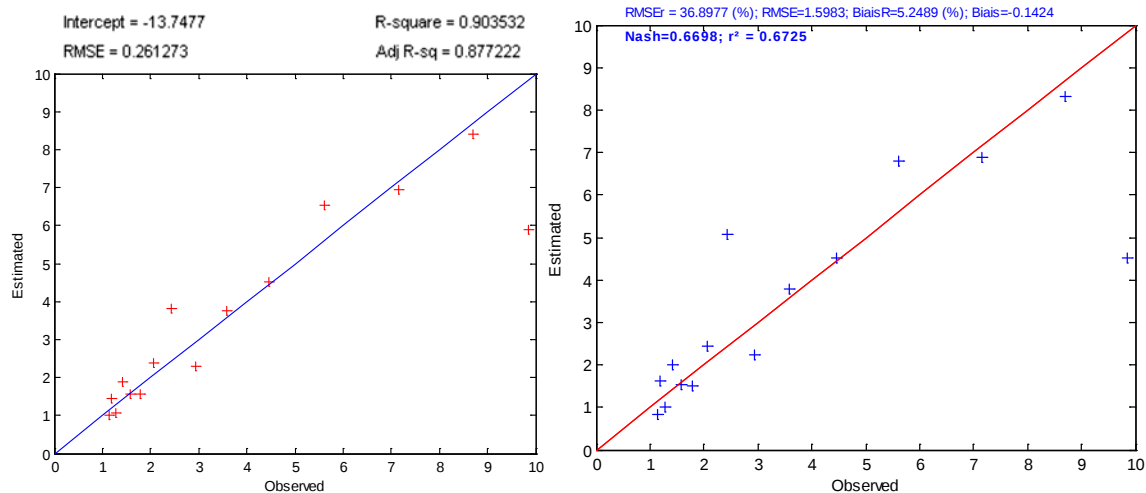
3. Fortement

Les observations du sol pour le site marocain

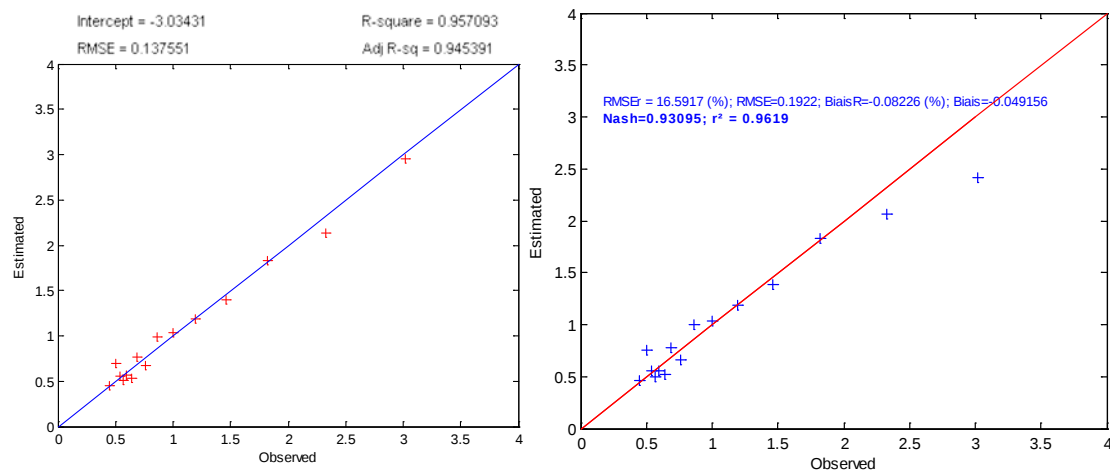
EC (mS/cm)			Échantillons	Changement du couvert végétal			Changement d'humidité			Changement de rugosité		
Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	N° terrain	campagne 1	campagne 2	campagne 3	campagne 1	campagne 2	Campagne 3	Campagne 1	campagne 2	campagne 3
2.84	1.54	0.77	35	peu résidus secs	peu résidus secs	nul	0	3	1	1	1	2
3.01	9.04	0.89	7	Nul	nul	moyen	0	3	1	2	2	2
2.19	1.1	0.52	17'	peu résidus secs	peu résidus secs	nul	0	3	1	1	1	2
0.99	1.4	1.11	18	résidus secs	peu résidus secs	grand	0	3	1	3	2	2
5.02	7.2	2.4	6	Nul	nul	faible	0	3	1	1	3	3
1.31	1.91	0.51	5	résidus secs	résidus secs	faible	0	3	1	1	1	1
3.52	9.1	3.42	12	Nul	faible	grand	0	3	1	3	2	2
1.14	2.59	0.5	22	Nul	nul	nul	0	3	1	3	3	3
3.26	6.55	0.78	23	Nul	nul	nul	0	3	1	3	3	2
1.35	1.97	1	8	résidus secs	résidus secs	nul	0	3	1	3	3	2
1.54	2.33	0.89	3	peu résidus secs	peu résidus secs	grand	0	3	1	2	2	2
1.5	1.87	0.59	4	Nul	nul	presque nul	0	3	1	3	2	2
0.71	5.17	1.3	29	Nul	nul	nul	0	3	1	3	3	2
9.01	6.65	1.37	24	résidus secs	résidus secs	nul	0	3	1	1	1	2
1.51	1.58	0.42	26	Nul	nul	nul	0	3	1	3	3	3
1.6	1.17	0.87	36	résidus secs	résidus secs	nul	0	3	1	2	2	1
1.4	2.8	0.94	16	résidus secs	nul	nul	0	3	1	3	3	3
1.47	2.94	0.54	27	peu résidus secs	nul	nul	0	3	1	1	0	2
14.96	15	3.23	31	résidus secs	résidus secs	nul	0	3	1	1	1	3
1.18	10.4	0.45	31'	Nul	nul	nul	0	3	1	3	3	2
1.19	1.32	0.54	27'	nul(OlivierAcoté)	nul(OlivierAcoté)	nul(OlivierAcoté)	0	3	1	3	3	3
4.57	3.33	0.95	10	Nul	moyen	faible	0	3	1	3	3	1
1.34	1.25	0.86	19	peu résidus secs	peu résidus secs	peu résidus secs	0	3	1	1	1	1
3.62	10.2	1.34	11	Nul	Moyen	nul	0	3	1	2	1	3

Annexe B : Les modèles d'estimation de la CE et leur validation — le site marocain.

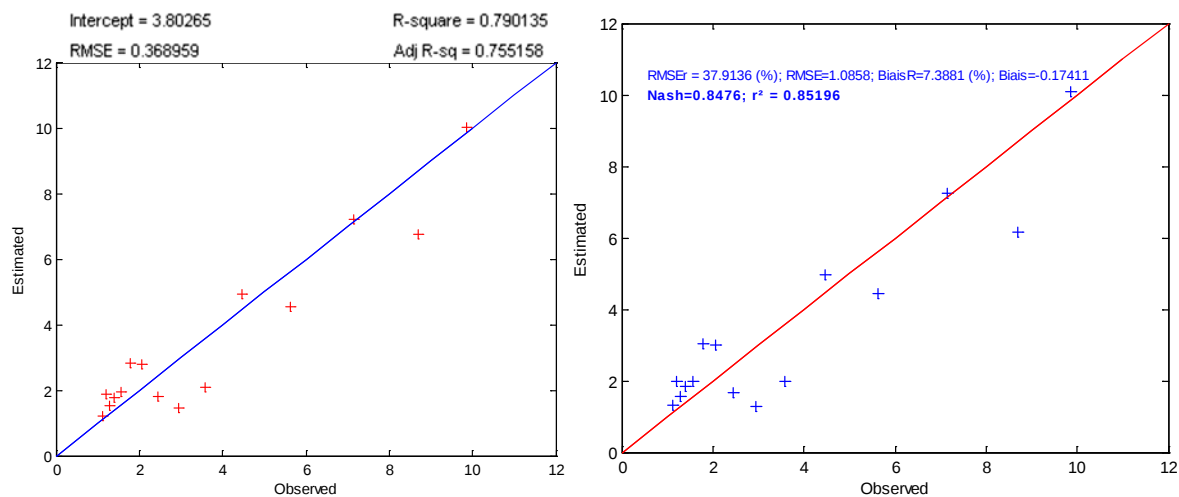
FQ9 (21/10/2011) : CE estimée = $\exp(22.71 \cdot C11 + 27.485 \cdot derd + 13.5029 \cdot entropy - 13.7477)$



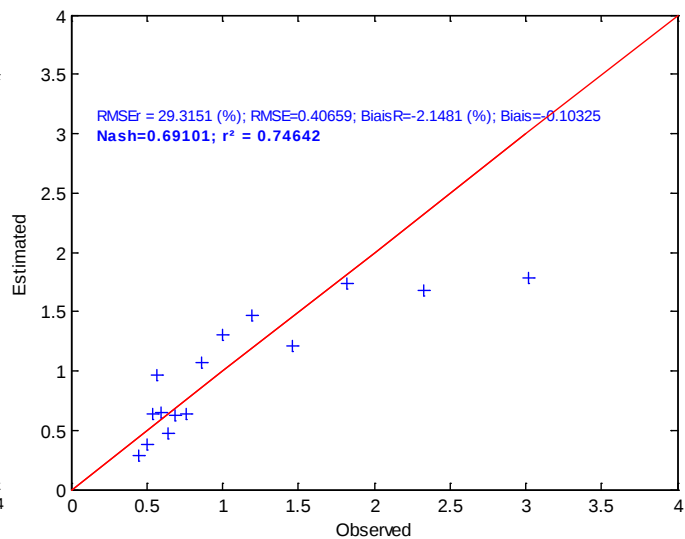
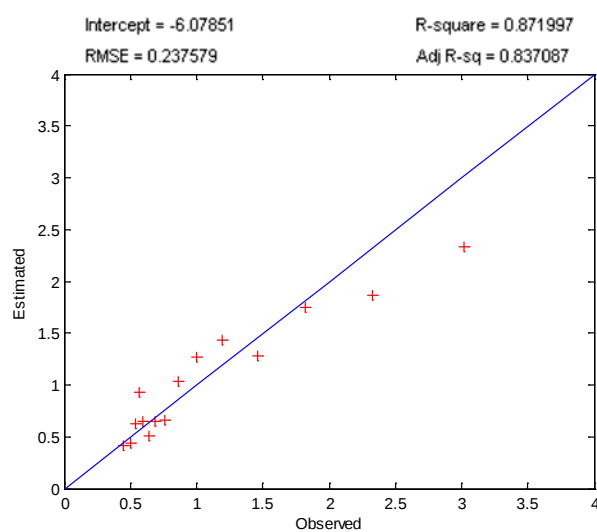
FQ9 (14/11/11) : CE estimée = $\exp(4.77913 \cdot entropy + 87.5333 \cdot Ro13 - 29.1052 \cdot Ro23 - 3.03431)$



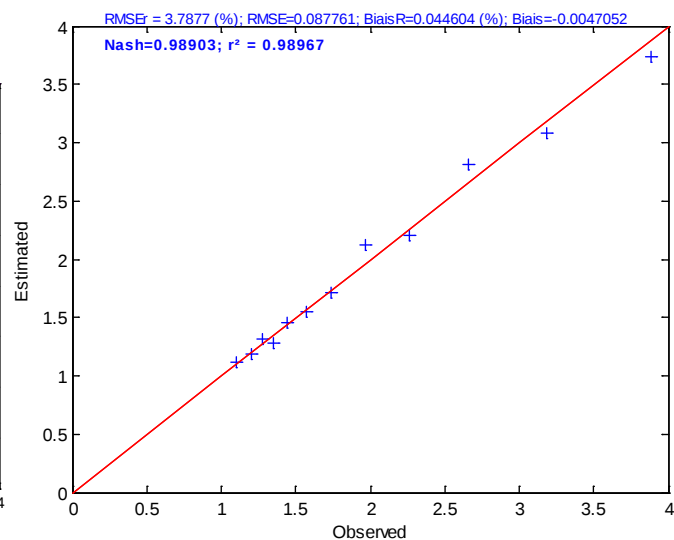
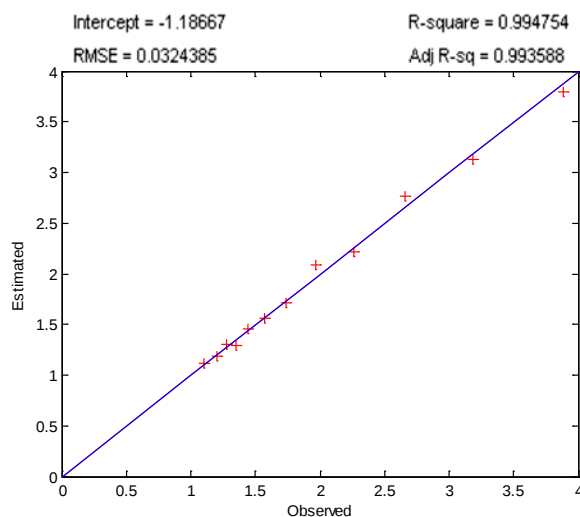
FQ16 (19/10/11) : CE estimée = $\exp(-18.9521 \cdot derd - 158.571 \cdot Ro23 + 3.80265)$



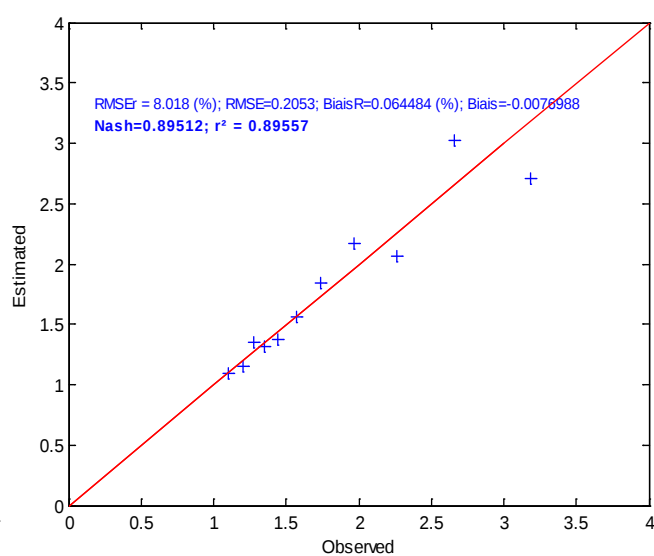
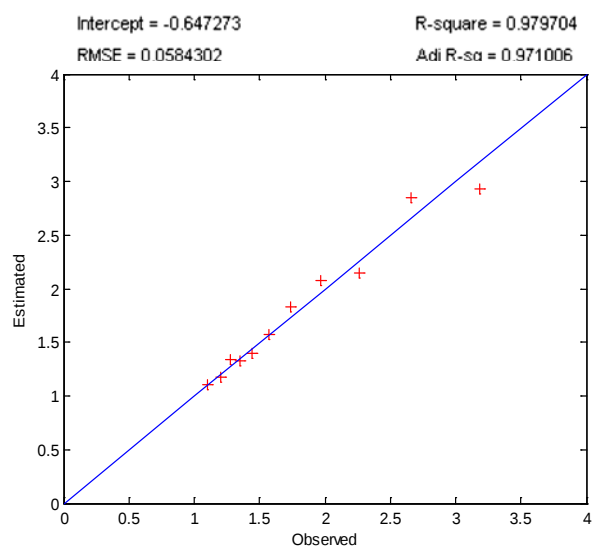
FQ16 (12/11/11) : CE estimée = $\exp(23.3301 \cdot C11 + 6.48025 \cdot \text{entropy} - 16.5481 \cdot Ro12 - 6.07851)$



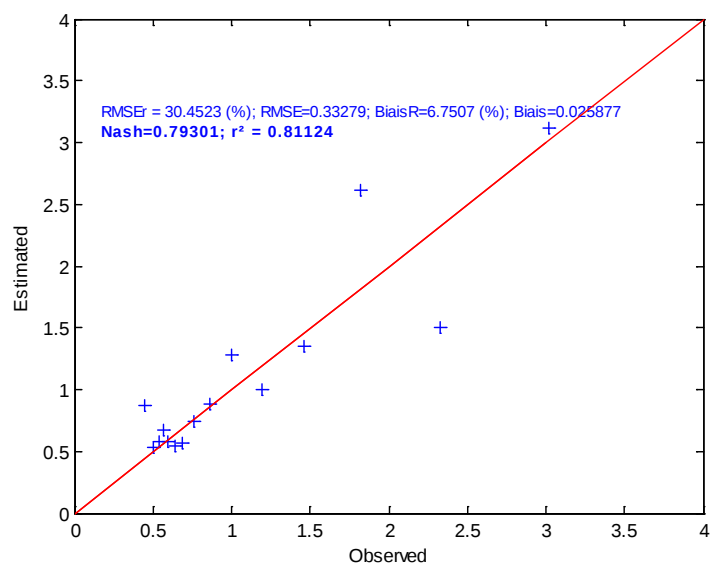
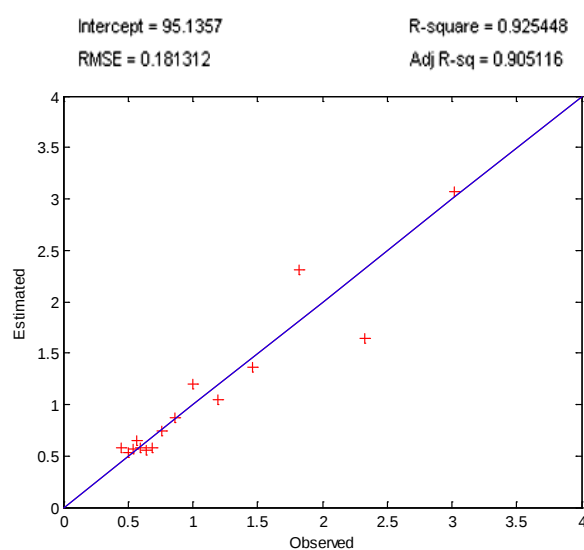
FQ22 (02/10/11) : CE estimée = $\exp(4.64499 \cdot Ro12 + 21.2623 \cdot T11 - 1.18667)$



FQ26 (30/09/11) : CE estimée = $\exp(15.5331 \cdot C11 + 31.1125 \cdot C22 + 6.77147 \cdot Ro12 - 0.647273)$

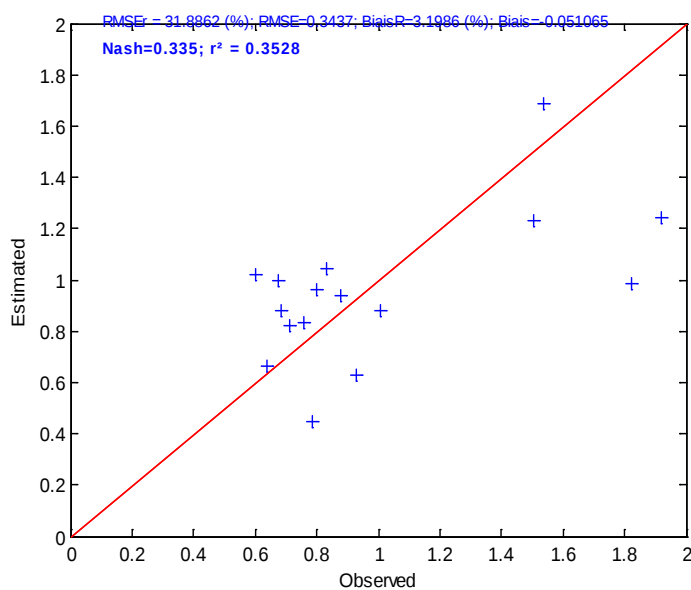
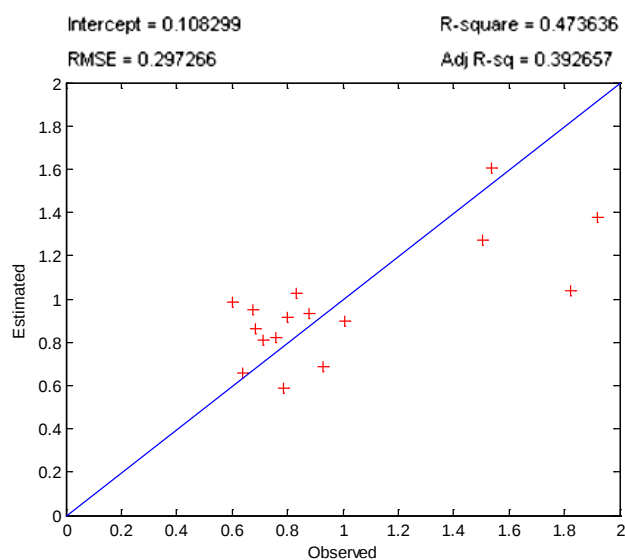


FQ26 (17/11/11) : CE estimée = $\exp(-537.376 \cdot C22 - 37.1584 \cdot Entropy - 88.329 \cdot Serd + 95.1357)$

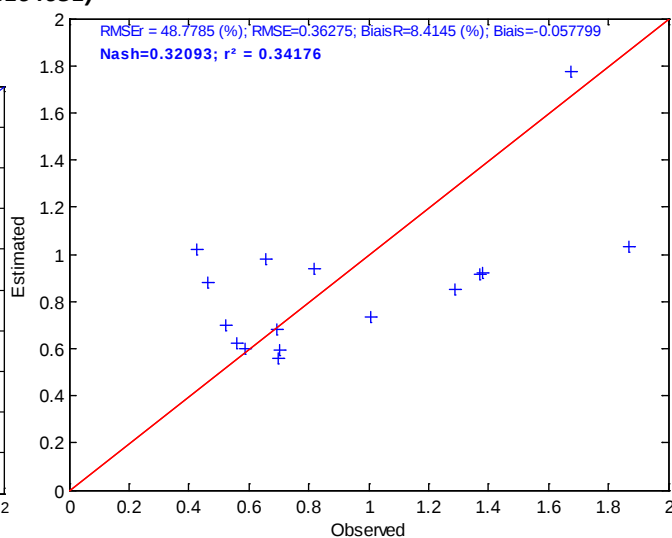
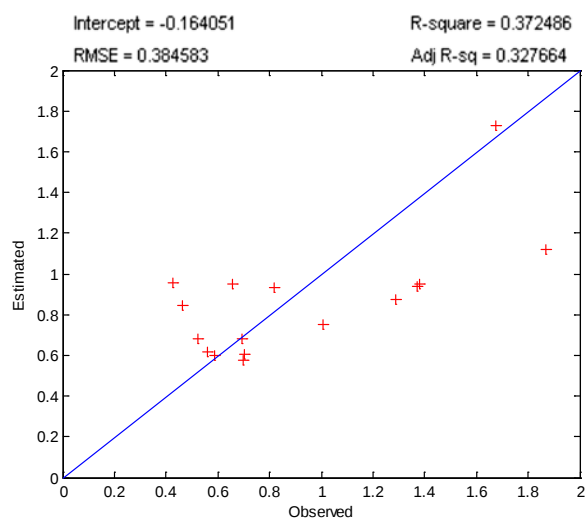


Les modèles d'estimation de la CE et leur validation — le site tunisien.

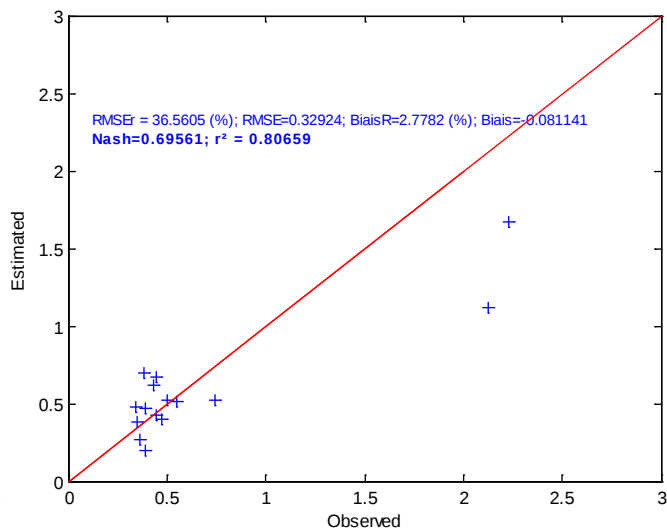
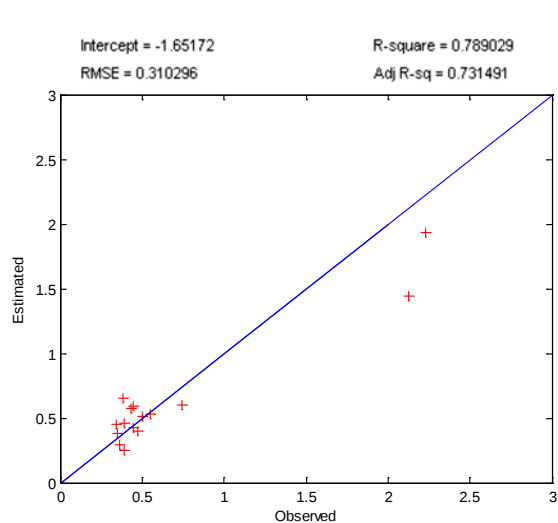
FQ7 (27/09/11) : CE estimée = $\exp(-0.885 \cdot entropy - 2.444 \cdot Ro12 + 0.108)$



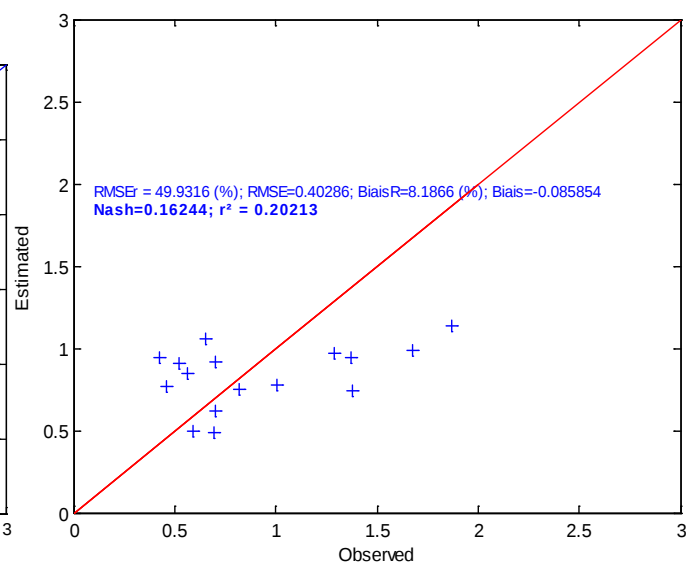
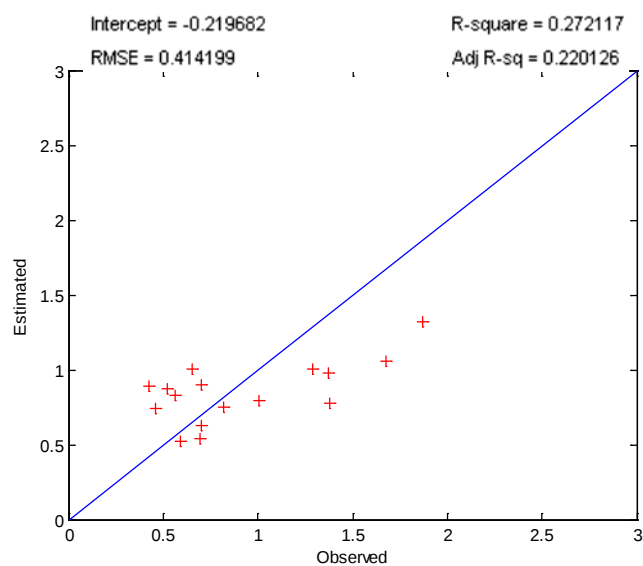
FQ7 (21/10/11) : CE estimée = $\exp(-3.89994 \cdot Ro23 - 0.164051)$



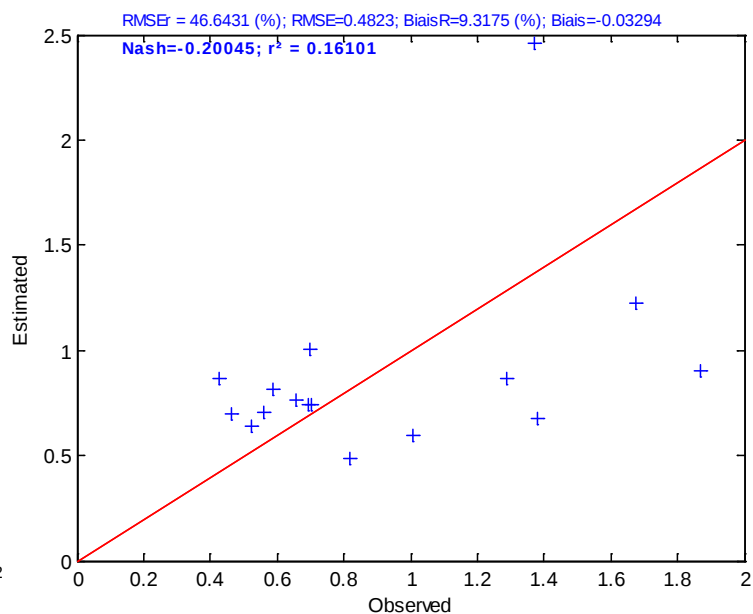
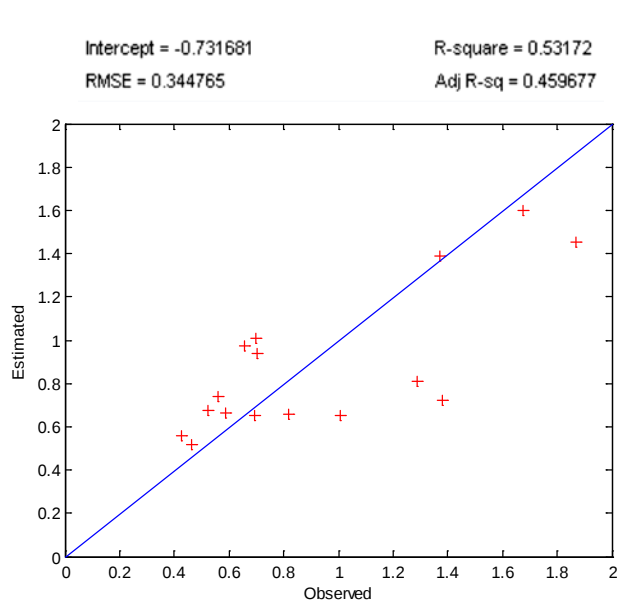
FQ7 (14/11/11) : CE estimée = $\exp(4.27228 \cdot \text{Anisotropy} - 1.29953 \cdot \text{Entropy} - 4.75069 \cdot \text{Ro12} - 1.65172)$



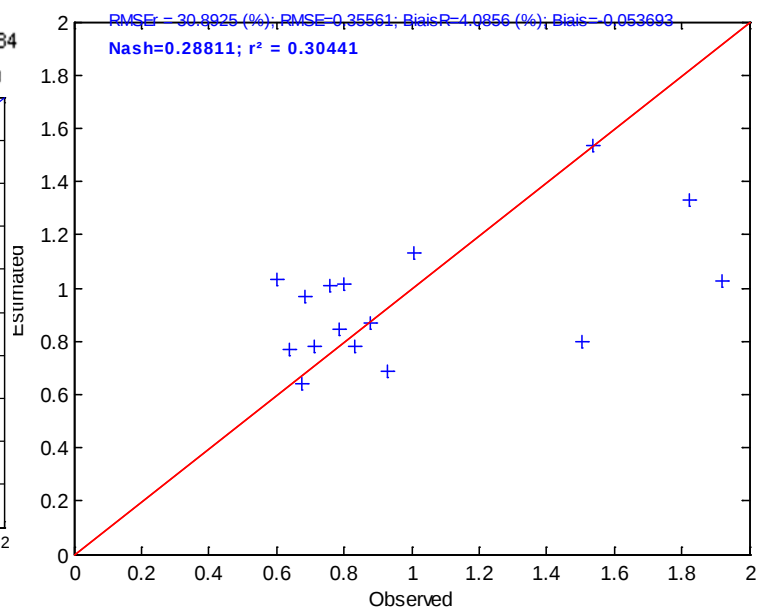
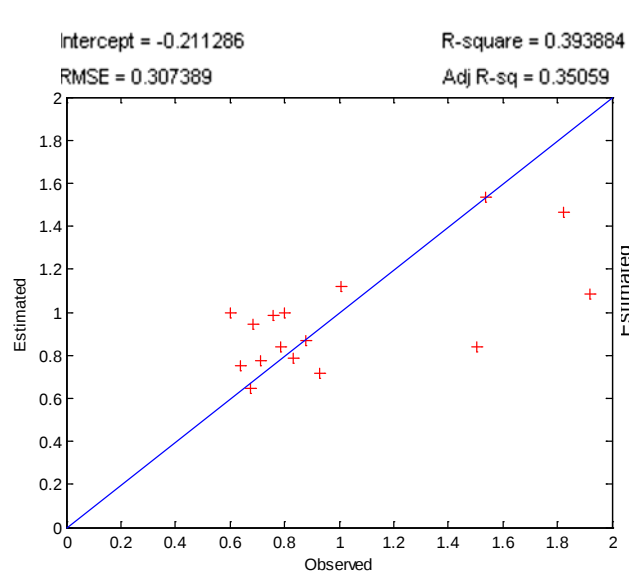
FQ9 (20/10/11) : CE estimée = $\exp(-5.49905 \cdot \text{Ro12} - 0.219682)$



FQ25 (23/10/11) : CE estimée = $\exp(230.973 \cdot \text{C22} - 76.1743 \cdot \text{T22} - 0.731681)$



FQ29 (01/10/11): CE estimée = $\exp(-2.49142 \cdot Ro12 - 0.211286)$



Annexe C : Analyse statistique

**Tableau 1. Les statistiques descriptives sur les propriétés analytiques des échantillons
(Mahdia campagne 1)**

Variables	Effectif	Moyenne	Écart-type d'échantillon	Minimum	Maximum
Élévation	17.000	98.510	25.729	72.333	152.333
CE (1/5)	17.000	2.792	9.842	0.073	42.100
CE (PS)	17.000	14.260	53.020	0.602	226.333
Humidité (%)	17.000	1.604	1.524	0.197	5.190
pH	17.000	8.839	0.210	8.357	9.090
% S	17.000	70.787	14.021	42.510	92.200
% A+ L	17.000	20.937	9.628	5.760	38.840
DA (g/cm3)	17.000	1.351	0.093	1.206	1.556

**Tableau 2. Les statistiques descriptives sur les propriétés analytiques des échantillons
(Mahdia campagne 2)**

Variables	Effectif	Moyenne	Écart-type d'échantillon	Minimum	Maximum
Élévation	17.000	100.407	26.200	72.333	72.333
CE (1/5)	17.000	2.307	8.215	0.074	0.074
CE (PS)	17.000	11.482	43.340	0.428	0.428
Humidité (%)	17.000	5.435	2.916	0.233	0.233
pH	17.000	8.495	0.323	7.987	7.987
% S	17.000	70.706	13.411	42.510	42.510
% A+ L	17.000	20.786	9.052	5.760	5.760
DA (g/cm3)	17.000	1.344	0.094	1.206	1.206

**Tableau 3. Les statistiques descriptives sur les propriétés analytiques des échantillons
(Mahdia campagne 3)**

Variables	Effectif	Moyenne	Écart-type d'échantillon	Minimum	Maximum
Élévation	17.000	100.407	26.200	72.333	152.333
CE (1/5)	17.000	1.790	5.152	0.060	22.723
CE (PS)	17.000	11.854	40.505	0.342	177.433
Humidité(%)	17.000	6.265	3.232	0.877	14.397
pH	17.000	8.488	0.331	7.817	9.073
% S	17.000	70.706	13.411	42.510	92.200
% A+ L	17.000	20.786	9.052	5.760	38.840
DA (g/cm3)	17.000	1.344	0.094	1.206	1.556

**Tableau 4. Les statistiques descriptives sur les propriétés analytiques des échantillons
(Tadla)**

Variables	Effectif	Moyenne	Écart-type d'échantillon	Minimum	Maximum
EC1	38	0.427	2.599	0.710	14.960
EC2	24	0.763	3.740	1.100	14.950
EC3	24	0.165	0.792	0.420	3.420

**Tableau 5. Matrice de corrélations de différentes variables de la première campagne
(Site tunisien)**

		Élévation	CE (1/5)	CE (PS)	Humidité	pH	%S	%A+L	da
Élévation	Corrélation	1							
	Sig.								
CE (1/5)	Corrélation	-0.16	1						
	Sig.	0.54							
CE (PS)	Corrélation	-0.18	0.99	1					
	Sig.	0.48	0						
Humidité	Corrélation	-0.14	0.60	0.58	1				
	Sig.	0.58	0.011	0.013					
pH	Corrélation	-0.28	-0.34	-0.30	-0.33	1			
	Sig.	0.26	0.17	0.23	0.18				
%S	Corrélation	-0.27	-0.006	0.14	-0.30	0.45	1		
	Sig.	0.28	0.98	0.95	0.23	0.06			
%A+ L	Corrélation	0.15	0.012	-0.004	0.38	-0.33	-0.97	1	
	Sig.	0.55	0.96	0.98	0.13	0.19	0		
Da	Corrélation	-0.26	0.54	0.55	0.14	-0.01	0.62	-0.60	1
	Sig.	0.31	0.02	0.02	0.57	0.96	0.007	0.01	

**Tableau 6. Matrice de corrélations de différentes variables de la deuxième campagne
(Site tunisien)**

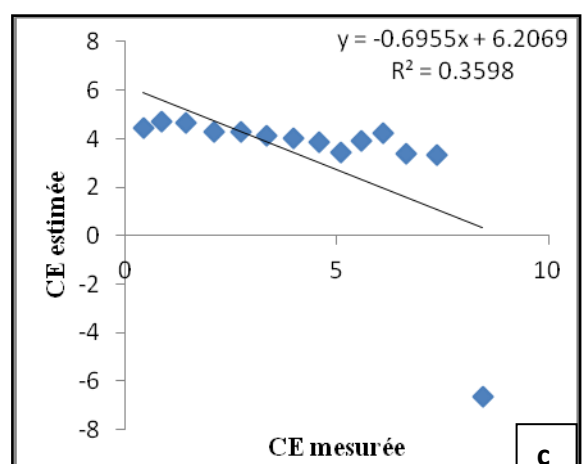
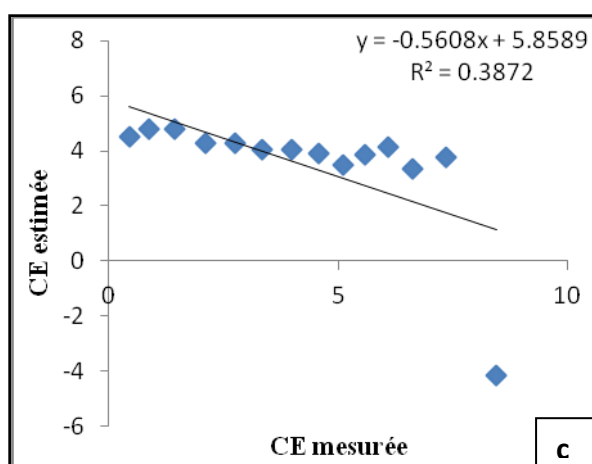
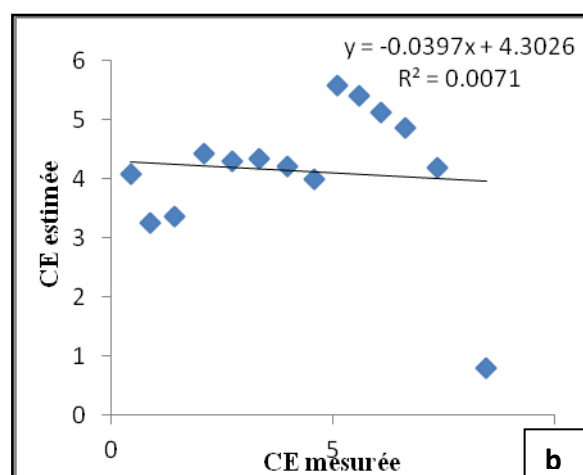
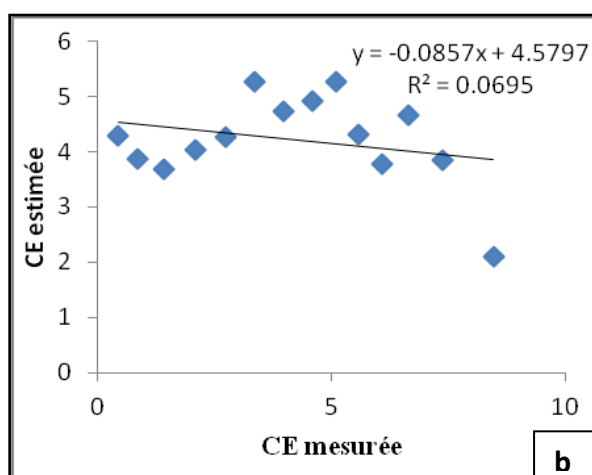
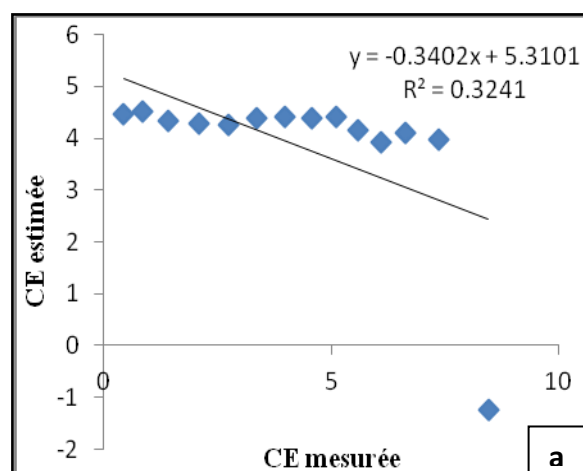
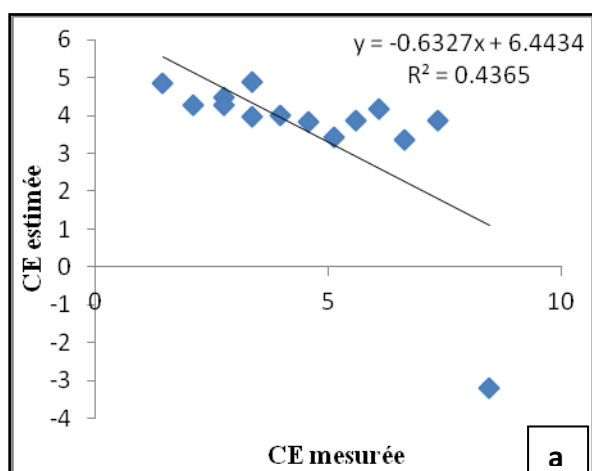
		Élévation	CE (1/5)	CE (PS)	Humidité	pH	%S	%A+L	da
Élévation	Corrélation	1							
	Sig.								
CE (1/5)	Corrélation	-0.18	1						
	Sig.	0.47							
CE (PS)	Corrélation	-0.18	0.99	1					
	Sig.	0.48	0						
Humidité	Corrélation	0.17	0.17	0.18	1				
	Sig.	0.50	0.51	0.47					
pH	Corrélation	-0.39	-0.28	-0.26	-0.18	1			
	Sig.	0.11	0.26	0.29	0.47				
%S	Corrélation	-0.31	-0.003	0.03	-0.49	0.66	1		

%A+ L	Sig.	0.21	0.99	0.98	0.04	0.004			
	Corrélation	0.19	0.015	0.008	0.45	-0.60	-0.97	1	
Da	Sig.	0.45	0.95	0.97	0.06	0.009	0		
	Corrélation	-0.26	0.54	0.55	-0.28	0.40	0.62	-0.60	1
	Sig.	0.31	0.024	0.02	0.26	0.11	0.007	0.010	

**Tableau 6. Matrice de corrélations de différentes variables de la troisième campagne
(Site tunisien)**

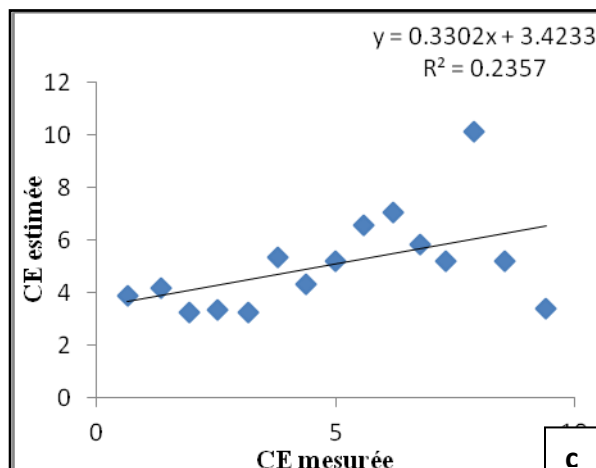
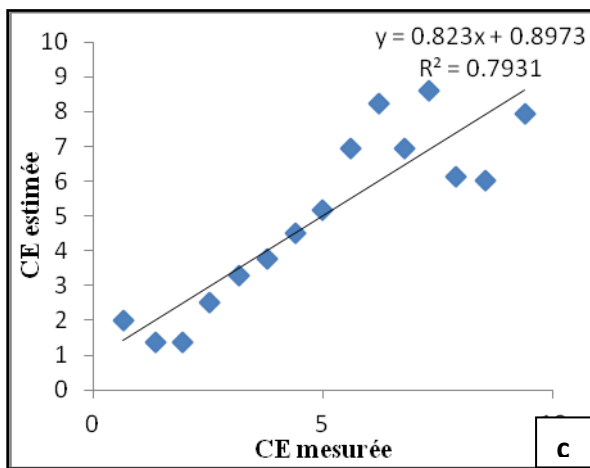
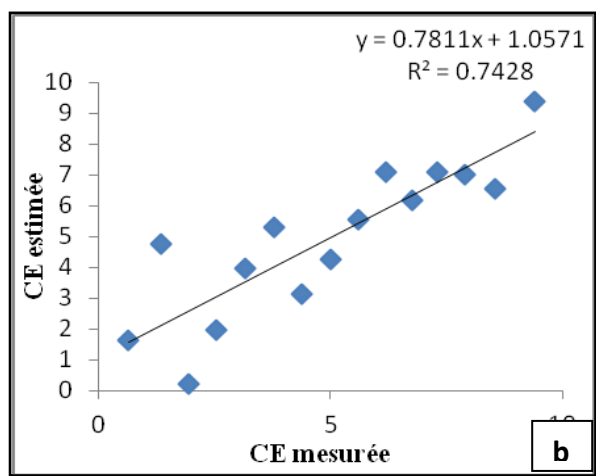
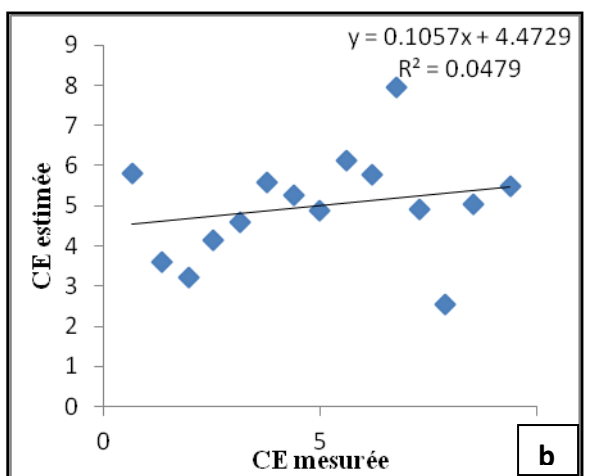
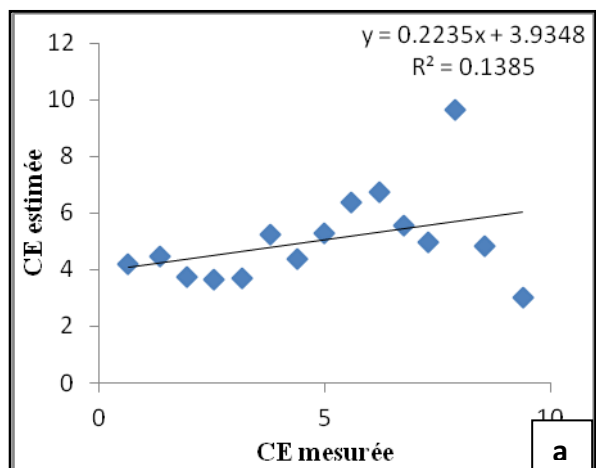
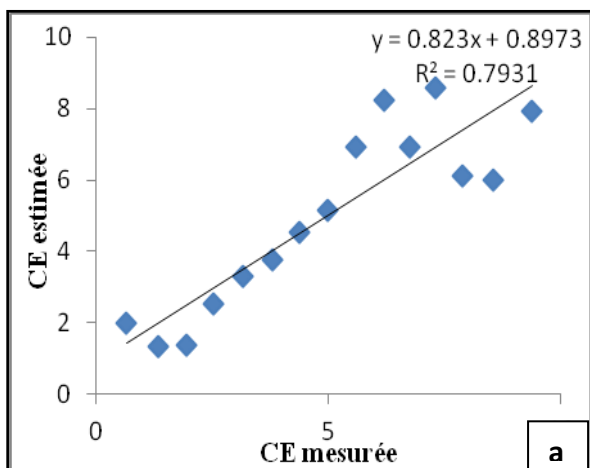
		Élévation	CE (1/5)	CE (PS)	Humidité	pH	%S	%A+L	da
Élévation	Corrélation	1							
	Sig.								
CE (1/5)	Corrélation	-0.22	1						
	Sig.	0.39							
CE (PS)	Corrélation	-0.21	0.99	1					
	Sig.	0.40	0						
Humidité	Corrélation	0.16	0.66	0.62	1				
	Sig.	0.52	0.004	0.007					
pH	Corrélation	-0.44	-0.26	-0.20	-0.72	1			
	Sig.	0.07	0.31	0.42	0.001				
%S	Corrélation	-0.31	0.03	0.047	-0.58	0.51	1		
	Sig.	0.21	0.90	0.85	0.015	0.03			
% A+ L	Corrélation	0.19	-0.017	-0.032	0.54	-0.45	0.97	1	
	Sig.	0.45	0.94	0.90	0.02	0.06	0		
Da	Corrélation	-0.26	0.54	0.56	-0.10	0.19	0.62	-0.60	1
	Sig.	0.31	0.023	0.019	0.68	0.44	0.007	0.01	

Annexe D : Validation croisée des modèles développés à l'aide de l'interférométrie



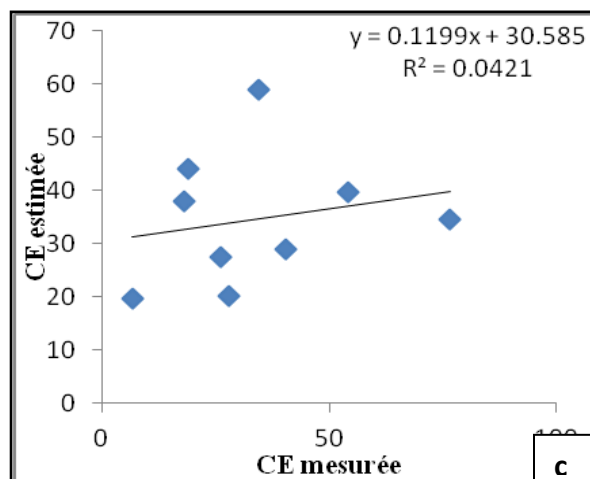
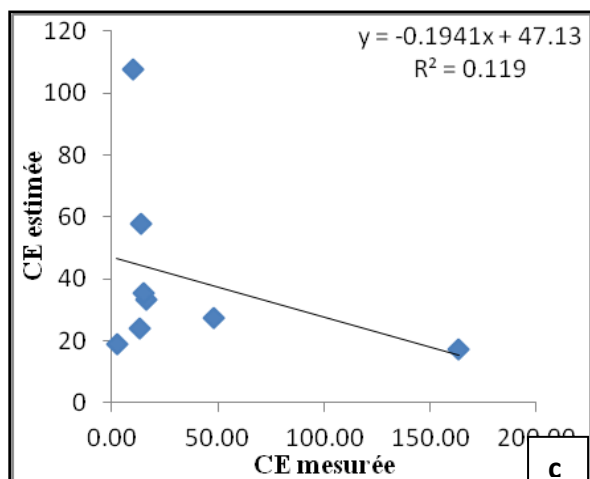
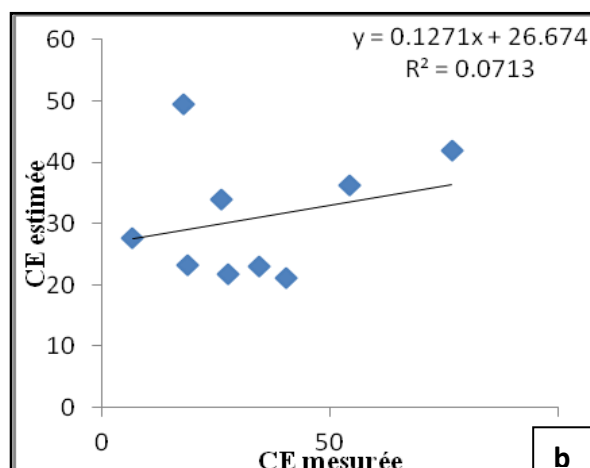
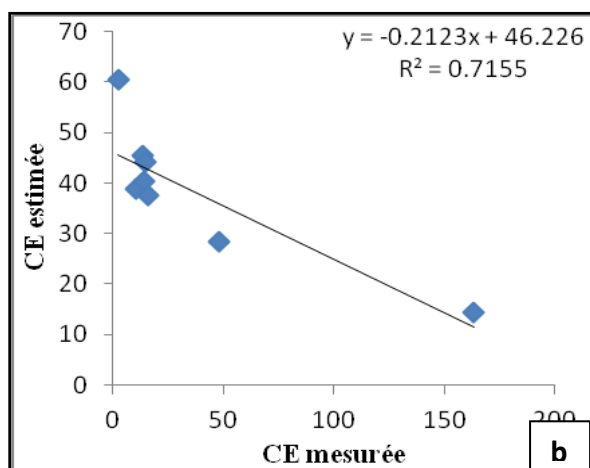
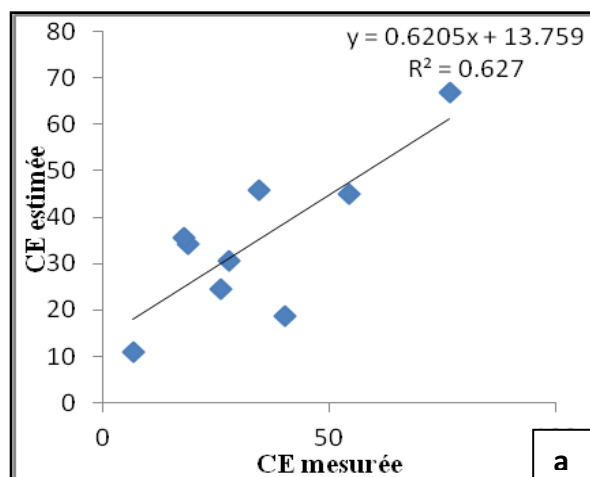
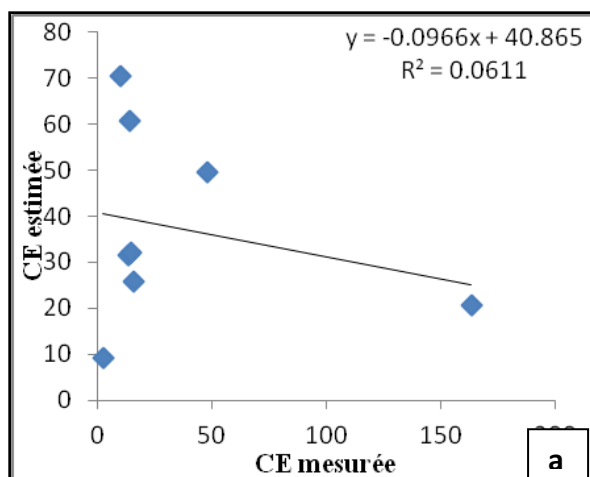
Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 1-2 pour le site marocain (28°) a) HH b) HV et c) VV

Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 1-2 pour le site marocain (44°.4) a) HH b) HV et c) VV



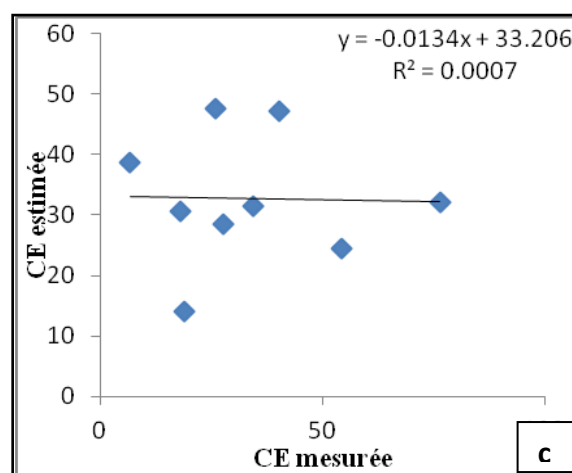
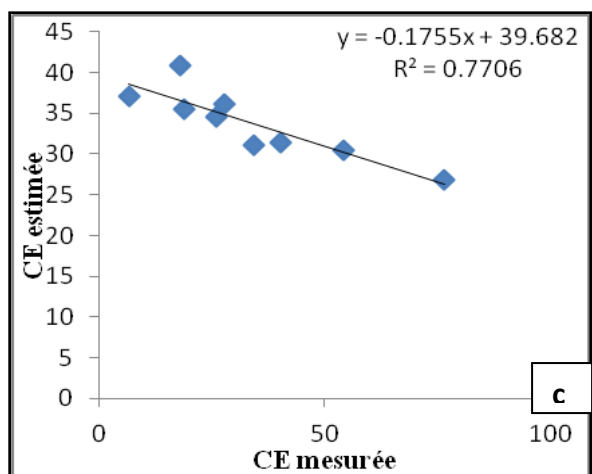
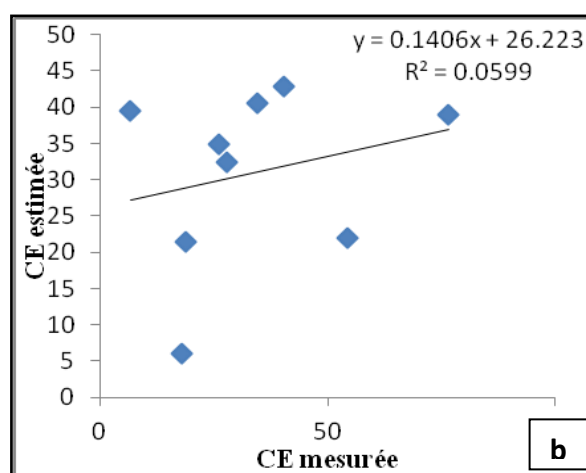
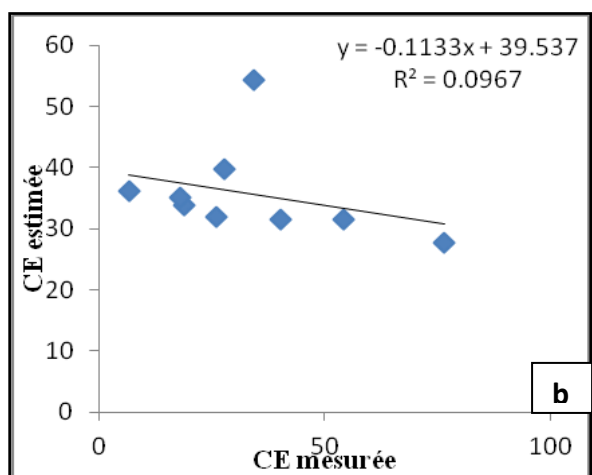
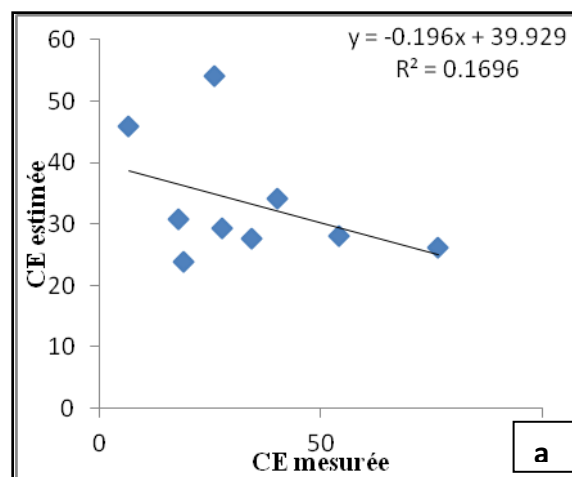
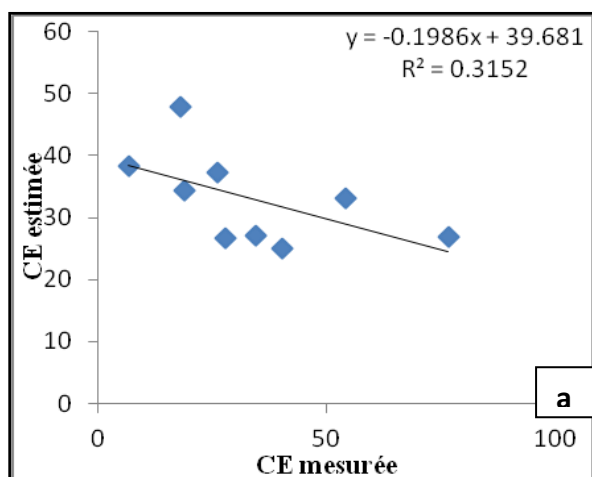
Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 2-3 pour le site marocain (35°.4) a) HH b) HV et c) VV

Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 2-3 pour le site marocain (44°.4) a) HH b) HV et c) VV



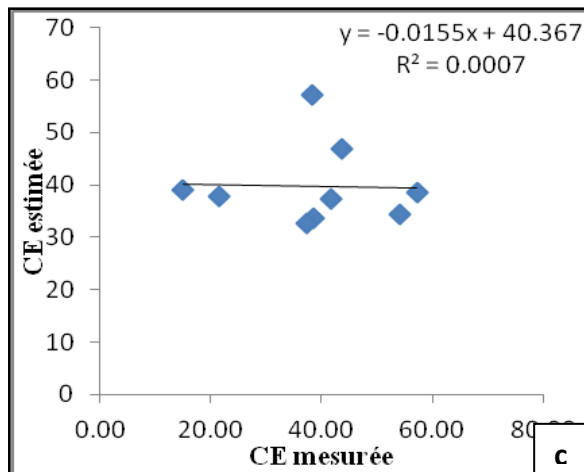
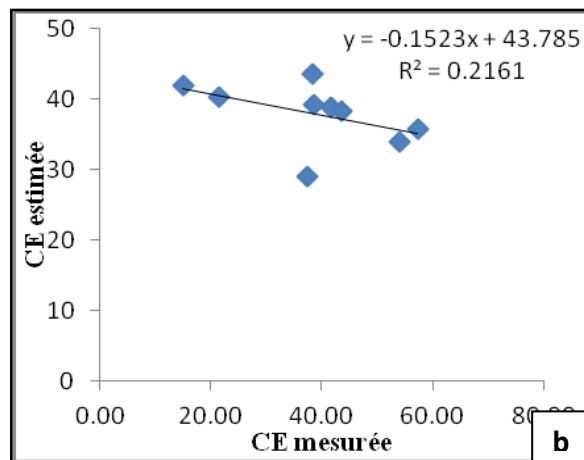
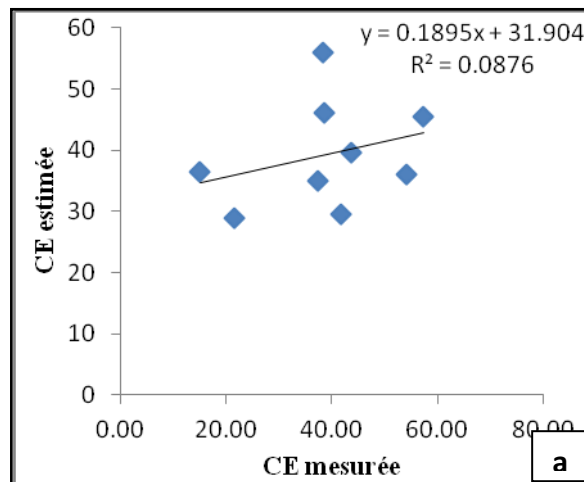
Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 1-2 pour le site tunisien (25°.7) a) HH b) HV et c) VV

Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 2-3 pour le site tunisien (25°.7) a) HH b) HV et c) VV



Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 2-3 pour le site tunisien (28°) a) HH b) HV et c) VV

Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 2-3 pour le site tunisien (43°.6) a) HH b) HV et c) VV



Les courbes de la validation croisée pour les modèles des campagnes 1-3 pour le site tunisien (25°.7) a) HH b) HV et c) VV

Annexe E : Photos des campagnes de terrain

Maroc

	 A photograph showing two people standing in a field of dry, low-lying vegetation. One person is wearing a dark jacket and a hat, and the other is wearing a red shirt and a cap. They appear to be examining something in the field.		Sol à faibles résidus
	 A close-up photograph of the soil surface, showing deep, irregular cracks in the dry earth. Small green plants are growing between the cracks. A small, round, light-colored object is visible on the ground.		Sol presque nu avec végétation faible
	 A close-up photograph of the soil surface, showing a mix of dark brown and lighter, sandy soil. There are some small pieces of organic matter and a small, round, light-colored object (possibly a coin) placed on the ground for scale.		Sol nu dans une zone névralgique

	Sol nu labouré et rigoureux
---	------------------------------------

Tunisie

	Des oliviers écartés de densité 24*24 (635 403 ; 3 892 018)
	Sol nu (Sebkha) (635 226 ; 3 891 326)



Sol presque nu quelques plantes
halophiles
(635 476 ; 3 891 419)



Sol presque nu plus ou moins
rugueux
(635 461 ; 3 891 663)



Parcelle des jeunes oliviers
(634 134 ; 3 892 481)



Parcelle des oliviers d'une faible
densité
(629 120 ; 3 892 118)



sols presque nus plus ou moins
rugueux
(629 479 ; 3 892 054)



sols presque nus plus ou moins
rugueux
(628 339 ; 3 893 037)



sol presque nu

(628 122 ; 3 893 306)



parcelle légèrement labourée
avec la présence des adventices

(628 073 ; 3 893 266)



parcelle légèrement labourée
avec la présence des adventices

(626 198 ; 3 895 437)

	sol presque nu (626 034 ; 3 896 204)
	sol presque nu plus ou moins rugueux (626 034 ; 3 898 449)
	parcelle d'olivier très espacée donc sol presque nu présence des adventices (626 042 ; 3 896 249)

	sol presque nu (626 128 ; 3 899 217)
	sol labouré (624 517 ; 3 904 689)
	sol labouré (623 974 ; 3 905 146)



sol presque nu
(623 074 ; 3 905 980)