

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة – الحراش - الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH - ALGER

Mémoire

Présenté pour l'obtention du titre
Magister de l'école nationale supérieure d'agronomie

Ecole Doctorale : science du sol

Réalisé par : *M. Amriche Atef Alla Eddine*

**Apport des images radar (ASAR) pour la cartographie de
l'humidité du sol en milieu semi-aride : cas de la région de Sétif.**

Directeur de thèse :

M. GUERFI Mokhtar

Présentée devant le jury compose de :

- | | | |
|----------------|-------------------------------|-----------|
| - M. Djili K. | Professeur à l'ENSA | Président |
| - M. Semar A. | M.C.A. à l'ENSA | Examineur |
| - M. Gaouas A. | Maître assistant "A" à l'ENSA | Examineur |

Dédicaces

A la mémoire de ma grande mère,

*A mes chers parents, pour leur amour, soutien et encouragement durant
mes années d'étude.*

Remerciements

Plusieurs personnes ont contribué à la production de ce travail de thèse par leur support moral, leur conseils ou participation.

Je tiens à remercier tout d'abord Monsieur Mokhtar GUERFI, mon directeur de thèse et encadrant pour ses riches conseils et enseignements scientifiques, pour sa disponibilité permanente et pour toutes les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir.

Remerciements très spéciaux à mes enseignants du département science du sol Monsieur Youcef DAOUD, Monsieur Mohamed El Hadi OULD FERROUKH et Madame Nacera KOURGLI pour leur encouragement, leurs conseils et leur disponibilité.

Un grand merci à Monsieur Kaddour DJILI, chef du département science du sol de l'ENSA pour son aide et sa disponibilité, et pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce mémoire et de présider la commission d'examen.

J'exprime ma reconnaissance envers Monsieur Ahcene SEMMAR et Monsieur Abderrezak GAOUAS, membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mes travaux.

Je remercie également, monsieur Achiri et monsieur Hanachi de l'INRA de Sétif pour leur aide durant ma première sortie de terrain.

Un grand merci à tout ce que j'ai côtoyé quotidiennement durant mes travaux, en particulier, à mes amis Jitřenka, Lylia, Halima, Sadjia, Abdallah et Oussama pour leur présence et soutien moral, à Zinou de l'INRA de Sétif pour son aide, à Omar, Khaled, Kamel et Reda pour l'accueil et l'ambiance lors de mes sorties de terrain, à mes collègue de l'ENSA et à tous les autres.

Résumé

L'humidité du sol joue un rôle essentiel dans la germination des graines et la croissance des plantes. C'est un paramètre clé pour établir le calendrier d'irrigation et pour l'estimation des rendements. L'utilisation de la télédétection pour l'estimation et la cartographie de l'humidité du sol offre une résolution spatiale et temporelle intéressante.

Dans ce travail, une approche simple a été développée pour la cartographie de l'humidité du sol à partir des données Envisat-ASAR. Quatre images de haute résolution couvrant une région semi-aride en Algérie ont été acquises avec la même configuration du capteur (mode, polarisation, fauchée ... etc.). Le prétraitement a été effectué à l'aide de l'outil BEST de l'agence spatiale Européenne. Ensuite, le coefficient de rétrodiffusion σ^0 (dB) a été extrait à partir des images filtrées et calibrées. D'autre part, cinq sites dont les propriétés physiques du sol et le type de couvert végétal diffèrent, ont été choisis pour le suivi de l'humidité. Les prélèvements de terrain ont été effectués ± 2 h autour de l'heure du passage du satellite. L'humidité du sol a été mesurée dans les cinq premiers centimètres en utilisant la méthode gravimétrique.

L'étude des régressions linéaires associées à l'approche de détection des changements a permis d'exprimer la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité volumique sous forme d'équation mathématique du type « $\sigma^0 = a * \theta + b$ ». Les coefficients "a" et "b" de l'équation varient légèrement d'un site à l'autre et aussi d'une saison à l'autre. La variation est principalement due aux changements de la rugosité de surface et de la biomasse végétale. Notre étude confirme une bonne corrélation entre l'humidité volumique du sol et le coefficient de rétrodiffusion radar pour les cinq sites (r varie entre 0,62 à 0,86). La comparaison entre l'humidité du sol mesurée et estimée prouve l'exactitude des modèles avec une erreur absolue moyenne inférieure à 5%. Finalement, des cartes de la distribution spatiale de l'humidité du sol ont été obtenues à partir des images radar acquises.

Mots clés : humidité du sol, télédétection, Envisat-ASAR, détection des changements.

Abstract

Soil moisture plays a critical role in seed germination and plant growth. It's also a key parameter for irrigation scheduling and crop yield prediction. The use of remote sensing for the retrieval and mapping of soil moisture offers interesting spatial and temporal resolutions thus allowing a precise study at a regional scale.

In this paper, a simple approach for mapping near-surface soil moisture from Envisat ASAR data was developed. Four high-resolution images covering a semiarid region in Algeria were acquired with the same sensor configuration (mode, polarization, swath ... etc). We performed the pretreatment using the Basic Envisat SAR Toolbox of the European Space Agency. Then, we extracted the backscattering coefficient σ^0 (dB) from the filtered and calibrated images. On the other hand, five sites with different soil physical properties and vegetation cover were selected for monitoring soil moisture. The field campaigns were conducted concurrent to satellite image acquisitions to measure soil water content in the top five centimeters using the gravimetric method.

The study of linear regressions associated to the change detection approach allowed the expression of the backscattering coefficient as a function of volumetric soil moisture ($\sigma^0 = a \cdot m_v + b$). The coefficients “*a*” and “*b*” of the equation slightly differ from one site to another and also from one season to the next. This difference is mainly due to the effects of surface roughness and vegetation biomass variations. Our study confirms a good agreement between the volumetric near-surface soil moisture and the radar backscattering coefficient for all the test fields (*r* values range from 0.62 to 0.86). The comparison between measured and estimated soil moisture proves the accuracy of the inversion models used here with a mean average error of less than 5%. At the end, high resolution maps of soil moisture distribution were obtained from the acquired radar images.

Key words : Soil moisture, remote sensing, Envisat ASAR, change detection.

ملخص

رطوبة التربة تلعب دوراً هاماً في نفاش البذور ونمو النبات، كما أنها عامل رئيسي لجدولة الري والتنبؤ بالمحاصيل. إستخدام الاستشعار عن بعد لحساب و رسم خرائط لرطوبة التربة يوفر رؤية شاملة و بالتالي يسمح بإنجاز دراسة دقيقة على نطاق إقليمي.

في هذا العمل، وضعنا مقارنة بسيطة لاستخراج خرائط رطوبة التربة القريبة من السطح من بيانات القمر الصناعي Envisat-ASAR وقد تم الحصول على أربع صور عالية الدقة لتغطية منطقة شبه قاحلة في الجزائر بنفس الإعدادات (واسطة ، إستقطاب ، رقعة... الخ).

أجرينا معالجة الصور باستخدام أداة BEST المطورة من طرف الوكالة الفضائية الأوروبية. ثم تم استخراج معامل الارتداد المبعثر σ^0 (ديسيل) من الصور التي تمت تصفيته و معايرتها. من ناحية أخرى، تم اختيار خمس مواقع مختلفة من حيث الخصائص الفيزيائية للتربة والغطاء النباتي لاستشعار رطوبة التربة. أجريت الحملات الميدانية متزامنة مع اكتساب صور القمر الصناعي لقياس رطوبة التربة في الخمس سنتيمترات السطحية باستخدام طريقة الجاذبية.

سمحت دراسة الانحدارات الخطية مع استعمال طريقة تغيير الكشف بالتعبير عن معامل الارتداد المبعثر على شكل معادلة نسبية لرطوبة التربة الحجمية ($\sigma^0 = A \times \theta + B$). المعاملان "أ" و "ب" من المعادلة السابقة يختلفان من موقع إلى آخر ومن موسم إلى آخر. هذا الاختلاف يرجع أساساً إلى تغييرات خشونة سطح التربة والكتلة الحيوية النباتية.

أكدت هذه الدراسة على وجود علاقة ارتباط جيدة بين رطوبة التربة الحجمية القريبة من السطح ومعامل الارتداد المبعثر للرادار في كافة حقول الاختبار (قيم r تتراوح بين 0.62 و 0.86). المقارنة بين مقادير رطوبة التربة المقاسة والمقدرة أثبتت دقة المعادلات المستخدمة حيث حصلنا على خطأ تقديري متوسط أقل من 5%. في النهاية، حصلنا على خرائط عالية الدقة لتوزيع رطوبة التربة من صور الرادار المكتسبة.

الكلمات المفتاحية : رطوبة التربة ، الكشف عن بعد، طريقة تغيير الكشف ، Envisat-ASAR

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	6
1. L'eau dans le sol	7
1.1. Le cycle de l'eau	7
1.2. Le sol et la ressource « eau »	10
1.2.1. Le sol et l'alimentation en eau des plantes	10
1.2.2. Le sol : un régulateur hydrologique	11
1.2.3. Le sol et la qualité des eaux	11
1.3. Intérêt de la connaissance de l'humidité du sol	11
1.4. Etude de l'état hydrique du sol	13
2. Estimation de l'humidité du sol par télédétection : état de l'art	15
2.1. La télédétection satellitaire passive optique et infrarouge	15
2.1.1. Généralités sur l'outil télédétection	15
2.1.2. Utilisation des images optiques et infrarouges pour l'estimation de l'humidité du sol en surface	17
2.2. La télédétection radar	18
2.2.1. Le radar, définition et principe	18
2.2.1.1. Les types de radar	19
2.2.1.2. Le radar à synthèse d'ouverture (RSO)	20
2.2.1.2.1. Le principe d'acquisition du radar à visée latérale	20
2.2.1.2.2. Amélioration de la résolution spatiale	22
• <i>La compression d'impulsion</i>	22
• <i>La synthèse d'ouverture</i>	22
2.2.1.3. Radiométrie sur les images radar	23
2.2.1.3.1. Calibration radiométrique des images radar	23
2.2.1.3.2. Le chatoiement (ou « Speckle »)	23
• <i>Le filtrage spatial</i>	23

• <i>Le filtrage temporel</i>	24
2.2.1.4. Facteurs influençant le signal radar	26
• <i>La rugosité de surface</i>	26
• <i>Le couvert végétal</i>	26
• <i>la longueur d'onde</i>	26
• <i>la polarisation</i>	27
• <i>l'angle d'incidence</i>	27
2.2.1.5. Les principaux satellites radar imageurs	28
2.2.2. Principe de l'estimation de l'humidité du sol par télédétection radar	29
2.2.2.1. Choix de la configuration du capteur	29
2.2.2.2. Méthodes et approches utilisées pour l'estimation de l'humidité du sol	30
2.2.2.2.1. <i>Approche de détection des changements</i>	31
2.2.2.2.2. <i>Modèles semi-empiriques (ex. : model de Dubois et model de Oh)</i>	33
2.2.2.2.3. <i>Modèles physiques (modèle de l'équation intégrale - IEM)</i>	36
2.2.2.3. Choix de la méthode	36
3. Présentation de la région d'étude	37
3.1. Localisation	37
3.2. Le relief	38
3.3. Climat	39
3.4. Le sol	41
3.5. Hydrologie	41
3.6. La végétation	42
<i>Chapitre II : Matériel et méthodes</i>	44
1. Description des données de terrain et des données de télédétection	45
1.1. Choix des sites d'étude	45
1.2. Description des sites d'étude	46
1.3. Description des données de télédétection	49
1.3.1. Le satellite Envisat	49
1.3.2. Le capteur ASAR	50
1.3.3. Caractéristiques des images acquises	51

2. Méthodologie	53
2.1. Collecte des données de terrain	53
2.1.1. Mesure de l'humidité de terrain	53
2.1.2. Prélèvements pour la caractérisation des propriétés physiques du sol	55
2.2. Traitement des données de télédétection	55
2.2.1. Le prétraitement des images Envisat	56
2.2.2. Le traitement des images Envisat	60
2.2.3. Réalisation des cartes de distribution de l'humidité de surface du sol	60

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Description et analyse des données	62
1.1. Suivi des paramètres climatiques	62
1.2. Les données de terrain	64
1.2.1. Caractéristiques physiques des sols des cinq sites étudiés	64
1.2.2. Suivi de l'humidité de surface	65
1.3. Les données de télédétection (Envisat, ASAR)	72
1.3.1. Effets du filtre de chatoiement	72
1.3.2. Evolution temporelle du coefficient de rétrodiffusion	74
1.4. Conclusion	83
2. Estimation de l'humidité du sol en surface à partir des données Envisat-ASAR	85
2.1. Etude statistique du comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité volumique du sol en surface	85
2.1.1. Cas d'un sol nu (site 1)	85
2.1.2. Cas d'une parcelle agricole cultivée en intensif (site 2 et 3)	86
a) Site 2	86
b) Site 3	88
2.1.3. Cas d'une parcelle agricole cultivée en intensif et irriguée (site 4 et 5)	90
2.2. Estimation de l'humidité du sol en surface à partir du coefficient de rétrodiffusion radar	91

2.3. Conclusion	93
3. Cartographie de l'humidité du sol	95
<i>Conclusion générale</i>	103
<i>Références bibliographiques</i>	106

Liste des figures

Figure 1. Cheminement des eaux de pluie (Duchaufour, 1994).....	9
Figure 2. Distorsions géométriques dues au relief sur images optiques.	16
Figure 3. Visée verticale et visée latérale.....	20
Figure 4. Radar latéral et résolution spatiales (Ulaby <i>et al.</i> , 1982)	21
Figure 5. Concept de la synthèse d'ouverture (Centre Canadien de Télédétection, 2002).....	22
Figure 6. Filtrage adaptif (Frost, Lee, gamma map) et filtre non-adaptif (moyenne et médiane).....	25
Figure 7. Exemples des mécanismes de rétrodiffusion (ESA, 2007)	26
Figure 8. Profondeur de pénétration calculée en fonction du contenu en eau dans le sol pour le site SMOSREX (Escorihuela, 2006).....	27
Figure 9. Comportement du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de l'angle d'incidence....	28
Figure 10. Relation entre le coefficient de rétrodiffusion (ERS-2) et l'humidité du sol à 5cm en considérant 3 sites notés C, S et T et 6 dates de janvier à septembre 1997 (Moran <i>et al.</i> , 1998).....	31
Figure 11. Distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dérivées des images RSO (Moran <i>et al.</i> , 1998).....	32
Figure 12. Relation entre le coefficient de rétrodiffusion corrigé et l'humidité volumique du sol en surface (à gauche : Wang <i>et al.</i> , 2004 et à droite Zribi <i>et al.</i> , 2011)	33
Figure 13. Comparaison entre l'humidité de la surface du sol estimée et celle mesurée, de Janvier 2004 à Octobre 2005 (Escorihuela, 2007).....	34
Figure 14. Comparaison des valeurs de l'humidité du sol estimée et mesurée (Monerris, 2009).....	35
Figure 15. Comparaison entre la constante diélectrique estimée et mesurée en bandes L et C.....	35
Figure 16. Localisation de la région d'étude.....	37
Figure 17. Relief de la wilaya de Sétif (Mouffok, 1997).....	38
Figure 18. Isohyètes des moyennes annuelles de précipitation de la wilaya de Sétif (Direction des services agricoles de Sétif, 2006).....	39
Figure 19. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson.....	40
Figure 20. Localisation des sites d'étude.....	45

Figure 21. Photos du site 1 Mezloug (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).....	46
Figure 22. Photos du site 2 Mezloug (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).....	47
Figure 23. Photos du site 3Ain Oulmane (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).....	47
Figure 24. Photos du site 4 à Mezloug (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).....	48
Figure 25. Photos du site 5 à Ain Arnet (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).....	48
Figure 26. Le satellite Européen Envisat et les Instruments à bord.....	50
Figure 27. Image de l'emprise du 17 mars 2011.....	52
Figure 28. Localisation des cinq parcelles étudiées.....	54
Figure 29. Chaîne typique de traitements du logiciel BEST.....	57
Figure 30. Représentation graphique des précipitations, de l'évaporation et de l'humidité relative dans la région de Sétif pendant la période de suivi (Station climatique Ain Sfia : 36°10'39,54'' Nord et 5°23'48'' Est).....	62
Figure 31. Photo de la croute de battance formée dans le site 1 (prise le 16 avril 2011).....	63
Figure 32. Photo des 15 premiers cm du sol dans le site 1 (prise le 16 mai 2011)	64
Figure 33. Représentation graphique des valeurs moyennes et de l'écart-type des valeurs de l'humidité volumiques mesurée dans le site 1.....	66
Figure 34. Représentation graphique des valeurs moyennes et de l'écart-type des valeurs de l'humidité volumiques mesurée dans le site 2.....	67
Figure 35. Représentation graphique des valeurs moyennes et de l'écartype des valeurs de l'humidité volumiques mesurée dans le site 3.....	68
Figure 36. Photo de l'irrigation par aspersion dans le site 4 (prise le 15 juin 2011).....	69
Figure 37. Schéma des lignes d'irrigation dans le site 4 peu avant les dates de prélèvement.....	70
Figure 38. Comparaison entre l'image calibrée non filtrée et les images calibrées filtrées (5*5, 7*7, 9*9 et 11*11pixels)	73
Figure 39. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 1 durant la période de suivi....	75
Figure 40. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 2 durant la période de suivi....	78
Figure 41. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 3 durant la période de suivi....	80
Figure 42. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 4 durant la période de suivi....	81
Figure 43. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 5 durant la période de suivi....	82

Figure 44. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité volumique du sol en surface et régression linéaire. <i>(a)</i> les échantillons du mois de mars et avril, <i>(b)</i> les échantillons du mois de mai.	86
Figure 45. Variation du coefficient de rétrodiffusion normalisé (humide-sec) en fonction de l'humidité volumique du sol en surface et régression linéaire.....	88
Figure 46. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité volumique du sol en surface et régression linéaire.....	89
Figure 47. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité volumique du sol en surface et régression linéaire.....	91
Figure 48. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 1.....	98
Figure 49. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 2.....	99
Figure 50. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 3.....	100
Figure 51. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 4.....	101
Figure 52. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 5.....	102

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison qualitative des méthodes de détermination de la teneur en eau du sol (Calvet, 2003).....	13
Tableau 2. Fréquences et longueurs des microondes.....	19
Tableau 3. Principaux satellites RSO actuels et anciens (Hostache, 2006).....	28
Tableau 4. Pluviométrie, température et ETP de la station météorologique de Sétif (moyennes mensuelles de 1981 à 2006).....	40
Tableau 5. Nombre de jours mensuel de gelée blanche (station météorologique de Sétif, moyennes mensuelles de 1981 à 2006).....	41
Tableau 6. Origine des eaux superficielles et souterraines (Direction de l’Hydraulique Sétif, 2003)..	42
Tableau 7. Occupation des sols dans la région de Sétif (Direction des Services Agricole, 2004).....	43
Tableau 8. Les différents modes et produits du satellite Envisat (ASAR Product Handbook, 2007)...	51
Tableau 9. Résultats des analyses de caractérisation et classes texturales des cinq sites étudiés.....	65
Tableau 10. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 1.....	66
Tableau 11. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 2.	67
Tableau 12. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 3.	68
Tableau 13. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 4.	71
Tableau 14. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 5.	71
Tableau 15. Statistiques descriptives des valeurs de σ^0 (dB) des images non filtrées et des images filtrées.	72
Tableau 16. Statistiques descriptives des valeurs de σ^0 dans les cinq sites pendant la période de suivi.....	74
Tableau 17. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$	85
Tableau 18. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$ dans le site 2.....	87
Tableau 19. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$ Dans le site 3.....	89

Tableau 20. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$	90
Tableau 21. Modèles d'inversions de l'humidité du sol en surface et étude statistique.....	92

Liste des abréviations

ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar (radar à synthèse d'ouverture avancé).
RSO	radar à synthèse d'ouverture.
SAR	Synthetic Aperture Radar.
HH	polarisation horizontale émise et reçue.
VV	polarisation verticale émise et reçue.
HV	polarisation horizontale émise et verticale reçue.
VH	polarisation verticale émise et horizontale reçue.
RU	la réserve utile (du sol).
Envisat	Environment-Satellite (satellite de l'environnement).
TDR	Time Domain Reflectometry (réflectométrie temporelle).
VIS	visible.
PIR	proche infrarouge.
IRT	infrarouge thermique.
MIR	moyen infrarouge.
NDVI	Normalized Differential Vegetation Index (index de végétation normalisé).
LAI	Leaf Area Index (indice de la superficie foliaire).
CR	capacité de rétention.
PFP	point de flétrissement permanent.
CN	compte numérique.
ESA	European Space Agency (agence spatiale Européenne).
BEST	“ B asic ERS/ E nvisat S AR T oolbox ”
AMI	Active Microwave Instrument (instrument microondes actives).
TIFF	format d'image.
GéoTIFF	image TIFF géocodée.
dB	décibels.

USDA	United States Department of Agriculture (département d'agriculture des états unis).
pF	potentiel de l'eau.
Da	densité apparente.
MAE	Mean Average Error (erreur absolue moyenne).
MAPE	Mean Average Percentage Error (erreur relative absolue moyenne).
RMSE	Root Mean Square Error (erreur quadratique moyenne).

Introduction générale

De toutes les activités humaines, l'agriculture est de loin la première consommatrice d'eau. La plante extrait l'eau du sol par les racines et l'émet dans l'atmosphère à travers ses stomates. Sa transpiration est donc déterminée par l'eau disponible sur l'ensemble de la zone racinaire. Par ailleurs, sur une grande partie du globe, la disponibilité en eau est le facteur limitant pour la croissance des plantes et donc pour l'agriculture.

En Algérie, le climat est diversifié à l'extrême. De l'hyperaridité à une forte humidité. Les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la partie nord du pays. En effet, l'eau constitue un facteur limitant au développement des cultures, excepté pour les 350 000 hectares irrigués (CNES, 1999 in Bouchetata, 2006). Cette situation de pénurie d'eau est la contrainte majeure pour l'agriculture, qui doit y répondre par la mise en place d'une gestion durable, économiquement et socialement viable, de l'usage agricole de l'eau.

Les stratégies mondiales ont tendance à mettre l'accent sur la nécessité d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau en agriculture. Ainsi, la connaissance de l'humidité du sol est très précieuse pour détecter les périodes de stress hydrique des végétaux afin de planifier une irrigation efficace, ou pour un avertissement précoce d'une période de sécheresse. L'humidité du sol affecte aussi le succès des opérations de semis, d'entretien et de récolte. Elle doit être prise en compte avant leur planification.

L'humidité du sol peut être mesurée au laboratoire selon la méthode gravimétrique classique, ou bien directement sur le terrain en utilisant la sonde à neutrons, ou la méthode des chocs thermiques, ou la méthode capacitive ou encore par réflectométrie temporelle. Ces méthodes, ponctuelles ou locales, plus ou moins précises, fiables et commodes d'emploi, sont bien adaptées à l'échelle de la parcelle, mais ne le sont plus à l'échelle du bassin versant ou de la région lorsque la variabilité spatiale de l'état hydrique prend toute son importance. Il est également indispensable d'évoquer la variabilité temporelle importante et rapide de l'humidité du sol, qui rend impossible l'utilisation des mesures ponctuelles pour les pratiques de gestion de l'eau à l'échelle régionale. Pour résoudre ce problème, des recherches sont menées, depuis une trentaine d'années, sur les possibilités d'utilisation de la télédétection pour l'estimation de l'humidité du sol (Hirosawa *et al.*, 1978, Moran *et al.*, 1998, Baghdadi *et al.*, 2007 ... etc.) Plusieurs méthodes ont été développées (Moran *et al.*, 2004). Elles sont destinées à être complémentaires aux méthodes « in situ » auxquelles elles ne doivent en aucun cas se substituer.

La télédétection est considérée comme l'outil le plus prometteur surtout pour un problème aussi complexe que la cartographie de l'humidité du sol. En effet, même dans les régions bien équipées en stations de mesure de l'humidité du sol, la précision actuelle des cartes d'humidité est toujours inférieure à 20%, ce qui peut signifier une erreur grossière dans le calcul des besoins en eau d'irrigation (Bonn et Escadafal, 1996). Le plus grand avantage offert par la télédétection satellitaire est la couverture globale (synoptique) des données hydrologiques, de la végétation, du sol et de la topographie. Ces données sont logistiquement et économiquement impossibles à obtenir à partir des réseaux d'observation au sol.

Comme pour les autres applications de la télédétection, les premiers travaux ont porté sur les domaines du visible et du proche infrarouge du spectre électromagnétique (IDSO *et al.*, 1975 ; El-Shikha *et al.*, 2007). Les études réalisées par la suite dans le domaine de l'infrarouge thermique ont montré un grand intérêt pour l'estimation de l'évapotranspiration, et donc indirectement pour le suivi de l'état hydrique des sols (Seguin et Itier 1983 ; Boulet *et al.*, 2009). Cependant, des contraintes liées à la couverture nuageuse, aux pluies et aux perturbations atmosphériques limitent considérablement l'utilisation de la télédétection optique et infrarouge pour certaines périodes de l'année et certaines régions du globe. Il en est autrement pour les hyperfréquences (ou microondes) qui sont quasi-insensibles à l'état de l'atmosphère (Jackson *et al.*, 1996 ; Liebe *et al.*, 2009). A cet avantage primordial s'ajoutent, à ces fréquences, une indépendance du rayonnement vis-à-vis de l'éclairement solaire (pour les systèmes actifs) et une capacité de pénétration à travers le couvert végétal et le sol lui-même. La quantité d'eau présente dans un sol affecte ses propriétés diélectriques. Ce sont ces propriétés diélectriques et quelques autres propriétés physiques du sol qui déterminent la mesure par microondes. L'expression des propriétés diélectriques dépend aussi des caractéristiques du capteur, en particulier de la longueur d'onde à laquelle il travaille.

Les recherches actuelles sur l'estimation de l'humidité du sol utilisant les ondes radar ont pour objectifs de développer des modèles d'inversion de l'humidité, de réduire au minimum les erreurs d'estimation par une comparaison aux mesures de laboratoire, et de généraliser ces algorithmes pour plusieurs types de sol, de reliefs et de conditions climatiques.

Plusieurs capteurs de nouvelle génération ont été développés, notamment l'instrument ASAR du satellite Envisat, PALSAR du satellite ALOS et SAR du satellite RADARSAT 2. Ils permettent l'utilisation conjointe des microondes passives et actives et offrent une palette de choix de polarisation du signal (HH, VV, HH/VV, HH/HV ou VV/VH), d'angle d'incidence (entre 15° et

50°) et de modes d'acquisition (Hostache, 2006). Ces capteurs créent de nouveaux défis pour les chercheurs. Il s'agit d'une part de choisir la configuration qui permet d'isoler le paramètre « Humidité du sol » en réduisant l'effet des autres facteurs pouvant influencer le signal radar, tel que la rugosité de surface. Et d'autre part, de valider les différents algorithmes et modèles mathématiques pour chaque capteur.

L'objectif principal de ce travail de recherche est de développer une méthodologie pour la cartographie de l'humidité de surface des sols en milieu semi-aride à l'aide des images radar à synthèse d'ouverture (RSO). Nous avons pris comme échantillons cinq parcelles test dans la région de Sétif, dans les hautes plaines de l'est de l'Algérie. La démarche adoptée dans le cadre de ce travail de recherche consiste en la comparaison des résultats des mesures de l'humidité du sol sur le terrain avec ceux obtenus à partir des images de télédétection acquises simultanément aux mesures de terrain.

Après le traitement et l'analyse des images RSO, nous avons établi le lien entre le coefficient de rétrodiffusion radar et les mesures de l'humidité du sol sur le terrain à travers les tests statistiques. Enfin, nous avons procédé à la réalisation des cartes de distribution spatiale de l'humidité du sol en surface à partir des images satellites acquises pour la zone d'étude.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre vise à replacer la thèse dans son contexte thématique et scientifique. Nous avons commencé par une présentation des concepts généraux concernant la ressource en eau et l'environnement, le cycle de l'eau dans la nature et l'intérêt de l'information sur l'humidité du sol dans les différents domaines. Ensuite, nous avons présenté les principes de l'utilisation de la télédétection pour l'étude de l'humidité du sol (dans le domaine optique, infrarouge et microonde), notamment à l'aide du radar à synthèse d'ouverture (RSO). Enfin, nous avons décrit brièvement la région d'étude. La description de la région d'étude comporte la localisation, le relief, le climat, le sol, l'hydrologie et la végétation.

Le deuxième chapitre constitue le noyau de ce travail de thèse. Dans cette partie, nous avons présenté une description des données expérimentales issues des cinq parcelles test dans la zone d'étude, et les données de télédétection acquises sur la région. Ensuite, nous expliquons en détails la méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail de thèse.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus. Nous avons commencé par une description et analyse des données de terrain et de télédétection dans chacun des sites d'étude. Par la suite, nous avons étudié le comportement du coefficient de rétrodiffusion RSO en fonction de l'humidité du sol en surface afin d'établir le lien entre ces deux paramètres. Enfin, nous utilisons les résultats de l'étude statistique pour créer des modèles d'inversion fiables pour l'estimation de l'humidité du sol en surface. Ces modèles sont utilisés pour générer des cartes de distribution de l'humidité du sol en surface à partir des images radar.

*Chapitre I. Synthèse
bibliographique.*

1. L'eau dans le sol

L'eau est la substance la plus répandue à la surface de la terre (71%). C'est l'essence même de la vie. C'est l'élément constitutif principal des plantes et des animaux et malgré cela, elle demeure en quelque sorte une énigme, un composant dont les propriétés uniques restent en partie sans explication.

L'importance de l'eau dans la nature et dans la vie de l'homme a été reconnue depuis l'aurore de la civilisation, et depuis que l'homme a pris conscience de ses réactions avec son milieu. Selon Marsily (2006) et le rapport de la FAO (2006), l'agriculture est la première consommatrice d'eau (70% des prélèvements et 84% de la consommation mondiale totale) suivie par l'industrie (20% des prélèvements et 4% de la consommation totale) et enfin la collectivité (10% des prélèvements et 2% de la consommation totale). Actuellement, l'accroissement continu de la population mondiale rend cette ressource de plus en plus rare ou bien conduit à son exploitation excessive dans de nombreuses parties du monde. Ainsi, la nécessité de gérer continuellement l'eau d'une manière efficace est devenue une des tâches cruciales de notre époque.

Les pratiques de gestion de l'eau nécessitent la connaissance de ses propriétés physiques fondamentales. En résumé, l'eau est une substance qui possède un comportement unique et complexe à la fois. Sans cesse, elle dissout ou libère des éléments. Elle est sujette à de fréquents changements de nature (solide, liquide ou vapeur) et de propriétés (viscosité, tension superficielle ... etc.) qui sont affectées par la température, la pression et les solutés. Bien que la quantité d'eau sur notre planète reste inchangée depuis plus de 3.5 milliards d'années, elle est en transformation incessante. On parle du cycle de l'eau (figure 1) où le moteur principal est l'énergie solaire.

1.1. Le cycle de l'eau

Les pluies qui tombent à la surface du sol se subdivisent en diverses fractions et donnent naissance à l'eau de ruissellement, l'eau de gravité et l'eau retenue.

* *L'eau de ruissellement* : le ruissellement désigne l'écoulement de l'eau soit à la surface du sol (R. superficiel) ou bien au sein de l'horizon, parallèlement à la surface du sol (R. hypodermique). Il se produit sur tout terrain en pente (même faible) soumis à des pluies assez violentes. Le premier type de ruissellement cause l'érosion hydrique alors que le deuxième type cause l'appauvrissement et l'entraînement latéral des particules les plus fines du sol (limons et argiles).

* **L'eau de gravité** : elle est entraînée par la force de la pesanteur. Elle circule dans les pores grossiers (supérieurs à 10 μ m), le plus souvent verticalement. Cette eau alimente le drainage profond (rapide et lent selon les dimensions des pores) si le sol est perméable ; mais lorsque la perméabilité des horizons profonds décroît au point de ne plus permettre l'évacuation des eaux de gravité et que la pente est très faibles ou nulle, il se forme une nappe superficielle qui ne subsiste que pendant les périodes pluvieuses et s'épuise par évaporation en périodes sèches ou par drainage profond très lent : c'est une nappe perchée temporaire.

* **L'eau retenue** : elle est stockée, après infiltration des pluies, dans les pores moyens et fins du sol (taille inférieure à 10 μ m). Les forces capillaires et d'adsorption sont suffisamment élevées pour s'opposer aux forces de gravité. L'eau retenue se subdivise en deux parties : l'eau capillaire (utilisable par les plantes) et l'eau adsorbée ou liée (non utilisable par les plantes).

* **L'évapotranspiration** : ce phénomène regroupe l'évaporation et la transpiration. L'eau de ruissellement superficiel ou bien hypodermique, l'eau de gravité et l'eau retenue sont soumises au phénomène de l'évaporation en saisons sèches quand la demande atmosphérique en eau augmente. Par ailleurs, les plantes évacuent une partie importante de l'énergie reçue du soleil et régulent leur température par transpiration.

* **La remontée capillaire** : l'eau du sol se déplace de la zone saturée vers la zone non saturée. Ces mouvements sont horizontaux au sein du même horizon, ou verticaux soit une remontée capillaire des eaux de profondeur (nappe perchée temporaire ou nappe phréatique profonde) vers la surface.

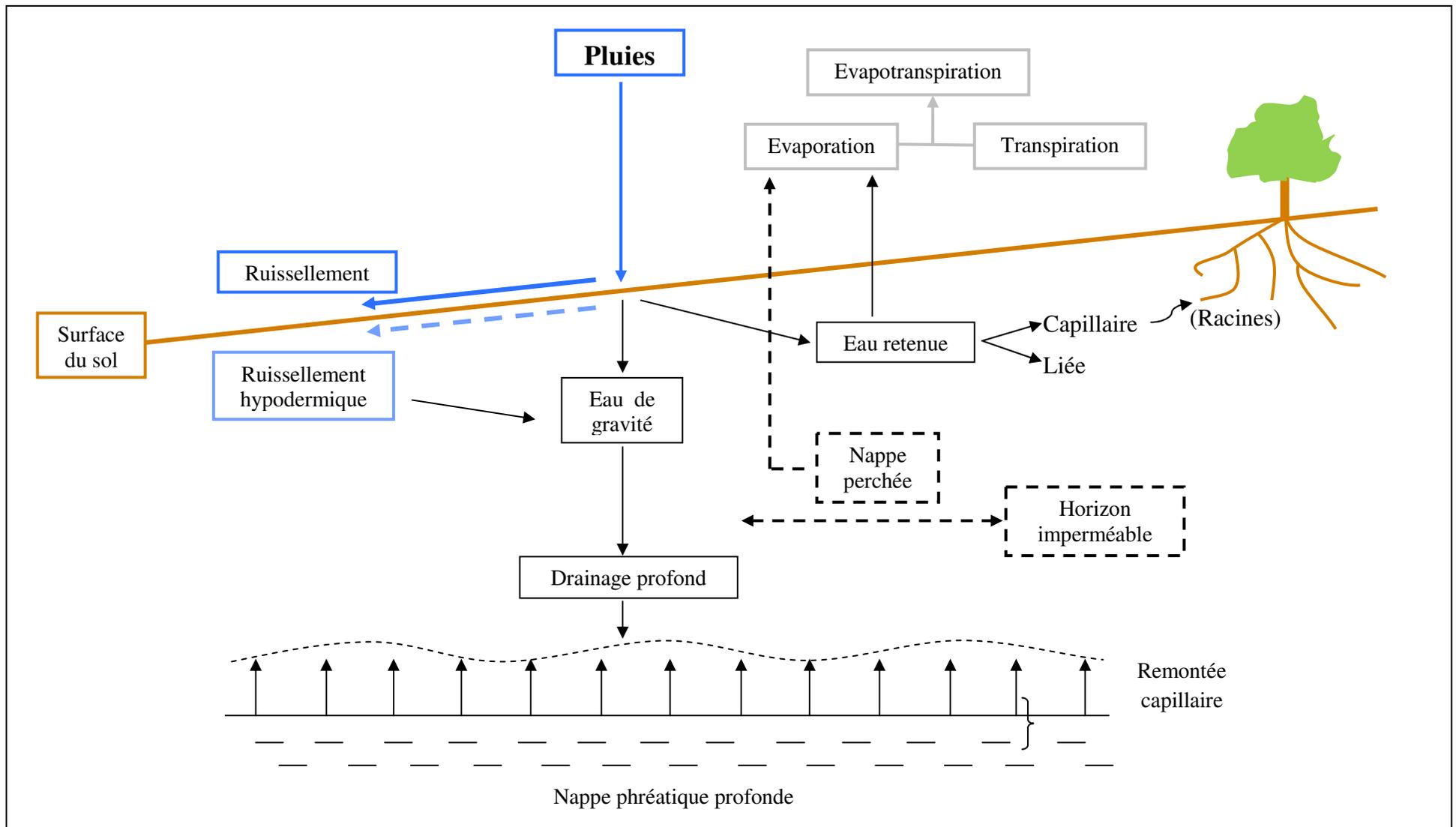


Figure 1. Cheminement des eaux de pluie (Duchaufour, 1994)

1.2. Le sol et la ressource « eau »

Outre son rôle de support de la végétation et des cultures, le sol constitue l'interface entre l'atmosphère et les réserves en eaux souterraines et de surface. Ses caractéristiques et les processus physiques, chimiques et biologiques dont il est le lieu interviennent dans l'alimentation des plantes, dans la régulation de la quantité et de la qualité des ressources en eau. D'importants et permanents échanges de matière et d'énergie (pluie, chaleur, gaz ...) se font à l'interface sol/atmosphère. Il s'ensuit que ses premiers centimètres jouent un rôle fondamental dans l'intensité des divers phénomènes qui se déroulent dans le profil du sol (Lambert, 1996).

1.2.1. Le sol et l'alimentation en eau des plantes

L'eau du sol est soumise à plusieurs champs de force qui sont à l'origine des différentes composantes de son énergie potentielle, il s'agit principalement de la force de gravité et des forces de rétention (ou sorption). Le sol est ainsi considéré comme un réservoir qui retient l'eau avec une énergie variable. Cette énergie est modérée pour l'eau capillaire absorbable et forte pour l'eau liée non absorbable. Du point de vue agronomique, on définit des valeurs seuils de l'humidité auxquelles on associe un degré de disponibilité de l'eau pour les plantes :

- ***La teneur en eau à saturation*** qui correspond au moment où tous les pores sont remplis d'eau.
- ***La capacité au champ*** qui correspond au maximum d'eau retenue par le sol (capillaire + liée). Cet état est atteint après ressuyage, lorsque tout écoulement gravitaire a cessé. Les macropores du sol se sont vidés et l'eau qui reste est stockée dans les micropores.
- ***Le point de flétrissement permanent*** correspond au potentiel hydrique à partir duquel les racines ne peuvent plus extraire l'eau. C'est la valeur limite de l'eau liée.

La capacité du réservoir sol est représentée par la réserve utile aux plantes (RU). Cette quantité est égale à la différence entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. L'eau de gravité qui se trouve dans les macropores du sol n'est pas retenue. Elle est drainée rapidement en profondeur et de ce fait elle n'est pas considérée comme utile pour les plantes.

La force de rétention de l'eau par le sol dépend de la surface des particules solides et de la quantité d'eau retenue (Calvet, 2003). Un sol argileux retient d'avantage plus d'eau qu'un sol limoneux et encore plus qu'un sol sableux. En revanche, un sol limoneux possède une meilleure réserve utile que celle d'un sol argileux. Ce dernier retient plus fortement l'eau

qui ne sera pas disponible pour les plantes. Par ailleurs, la force de rétention de l'eau baisse d'autant plus que l'humidité d'un sol augmente.

1.2.2. Le sol : un régulateur hydrologique

Le sol occupe une position centrale dans le cycle de l'eau. Il est le siège des phénomènes liés au stockage et à la circulation des fluides. Ses propriétés physiques, notamment la perméabilité et la capacité de rétention lui confèrent le rôle de régulateur hydrologique. Il est à noter que la couche superficielle est la plus importante dans les différents phénomènes d'échange entre l'atmosphère et le sol lui-même.

L'infiltration de l'eau dans le sol dépend de son état de surface et de sa perméabilité. Elle dépend donc de sa texture et de sa structure. La présence d'un horizon argileux lourd à la surface empêche l'infiltration et favorise d'avantage le ruissellement. Aussi, un événement pluvieux même de faible intensité sur un sol sec peut provoquer directement le ruissellement en cas de présence d'une croûte de battance par exemple (Lelong *et al.*, 1993 ; Le Bissonnais, 1988 ; Augeard, 2006).

Par ailleurs, le stockage de l'eau dans le sol dépend de sa porosité (pourcentage et taille des pores). Les plus grands pores favorisent la circulation rapide de l'eau mais n'interviennent pas pour la stocker. A l'opposé, l'eau circule lentement dans les pores de petite taille et ceux-ci assurent son stockage dans le sol.

1.2.3. Le sol et la qualité des eaux

La capacité plus ou moins grande du sol à retenir puis dégrader certaines molécules font de lui un système épurateur, plus ou moins efficace, contrôlant la composition et donc la qualité de l'eau qui ira recharger les réserves souterraines (Stengel *et al.*, 2009).

1.3. Intérêt de la connaissance de l'humidité du sol

La teneur en eau de surface des sols est importante à plusieurs égards (Bonn et Escadafal, 1996) :

- D'un point de vue agronomique, elle conditionne fortement la mise en place du peuplement végétal (germination des semences, émergence, implantation du système racinaire). L'humidité du sol définit également certaines conditions physiologiques auxquelles sont soumises les cultures (anoxie dans le cas des sols saturés p.ex.). Enfin, elle affecte la conduite culturale de la parcelle (traficabilité, p.ex.).

- D'un point de vue hydrologique, la teneur en eau de surface, fortement liée à la température de surface, conditionne les échanges avec l'atmosphère, à la fois par l'intermédiaire du bilan d'énergie à la surface du sol (très différent sur une surface sèche ou sur une surface humide) et par l'intermédiaire des propriétés physiques de surface directement liées à la teneur en eau (conductivité hydraulique p.ex.).

L'information sur la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface est indispensable pour des applications à l'échelle du bassin versant, telle que la prédiction des inondations et l'avertissement précoce des périodes de sécheresse. Du point de vue agricole, cette information est utilisée pour l'établissement du calendrier d'irrigation des cultures, la gestion des mauvaises herbes et la détermination de la mobilité des engins agricoles pour les différentes pratiques culturales (Moran *et al.*, 2004 ; Bryant *et al.*, 2003). Un manque d'information sur la distribution spatiale de l'humidité du sol affecte ainsi, en partie, la production végétale et le succès des programmes d'agriculture de précision (Mattei, 2006).

Il est également utile d'avoir une image globale de l'état hydrique du sol d'une parcelle basée sur une valeur moyenne de la teneur en eau et de sa variation temporelle qui permet de caractériser le régime hydrique du sol (Calvet, 2003). Sa description est utile à l'agronome en particulier, pour l'aider à estimer les réserves en eau disponibles pour les plantes afin de décider de l'opportunité des opérations d'irrigation.

Zribi *et al.* (2011) ont utilisés des données du capteur ASAR du satellite Envisat pour l'estimation de l'humidité du sol en surface afin d'évaluer l'évaporation en zone semi-aride. Par ailleurs, d'autres chercheurs ont travaillé sur la possibilité d'utilisation de l'information sur la distribution spatiale de l'évapotranspiration pour déterminer l'efficience de l'irrigation (Karatas *et al.*, 2009), et pour l'estimation de la consommation en eau des cultures et de la productivité (Li *et al.*, 2008).

L'humidité du sol en surface est également une variable essentielle pour de nombreux modèles de transfert d'énergie dans le système sol-végétation-atmosphère. Il en résulte une estimation assez juste de la distribution spatiale de la teneur en eau dans l'ensemble du profil du sol. (Courault *et al.* 2003 ; Moran *et al.*, 2004).

La quantification de la distribution spatiale des niveaux d'eau est d'une aide cruciale pour la modélisation hydraulique des inondations et la caractérisation tridimensionnelle fine de l'aléa inondation (Hostache, 2006).

Nghiem (2005) a utilisé des images du satellite de l'observation de la terre QuikSCAT de la NASA pour établir un système national de surveillance de l'humidité du sol en surface, permettant d'avoir une alerte précoce des périodes de sécheresse afin de prendre les mesures nécessaires.

1.4. Etude de l'état hydrique du sol

La teneur en eau ou l'humidité du sol est caractérisée en utilisant les méthodes classiques locales. Les points, soi-disant représentatifs d'une zone homogène dans une parcelle, sont choisis et font l'objet de prélèvements d'échantillons ou de mesures directes sur le terrain. Le tableau 1 résume les principales méthodes utilisées pour la caractérisation de l'état hydrique du sol.

Tableau 1. Comparaison qualitative des méthodes de détermination de la teneur en eau du sol (Calvet, 2003).

Méthodes	Utilisation					Références d'auteurs ayant développé la méthode
	Précision	Résolution	Laboratoire	Terrain	Automatisation sur le terrain	
Gravimétrie	+++	+++	+++	++	-----	Pas de références historiques particulières ; normes AFNOR
Atténuation des neutrons	+	-	+	+++	-	Pelegrin et Buscarlet, 1960 ; Couchat, 1967
Absorption des rayons γ	++	++	+++	+	+	Fergusson et Gardner, 1962 ; Gurr, 1962
Electrique, capacitance	+	+	++	++	+++	Kuraz et al, 1970
Electrique, résistivité	+	+	++	+++	+++	/
Electrique, TDR	++	+	+	+++	+++	Davis et Chudobiak, 1975 ; Topp et al, 1983

Le nombre de signes + et - indique l'importance des aspects positifs et négatifs des méthodes

- La méthode gravimétrique est inadaptée sur le terrain car elle nécessite du matériel de laboratoire (une étuve à 105°C et une balance de précision), ensuite il faut compter au moins 24 heures pour avoir les résultats. L'avantage offert est une très bonne précision ce qui fait de cette méthode une référence pour calibrer des modèles d'estimation de l'humidité du sol ou bien pour déterminer la précision des autres méthodes.
- La sonde à neutrons présente certaines limites d'application. Par exemple, en présence d'une teneur élevée en matière organique ou en ion chlorure (causant une surestimation de l'humidité), ou encore dans les sols caillouteux où l'implantation des tubes d'accès de la sonde est difficile.

- L'utilisation des rayonnements nucléaires présente un certain nombre d'inconvénients liés à la manipulation du matériel dont l'installation est délicate et nécessite des mesures de sécurité appropriées.
- Enfin, les méthodes basées sur les propriétés électriques des matériaux sont plus commodes d'emploi mais moins précises en comparaison avec la méthode gravimétrique par exemple.

Les conditions climatiques durant la mesure jouent un rôle très important, car elles affectent de façon considérable la variabilité temporelle de l'état hydrique du sol. En effet, durant la même journée, l'humidité du sol peut varier d'une valeur extrême à l'autre. Par conséquent, il est d'autant plus difficile de mesurer l'humidité du sol que la surface de la zone d'intérêt augmente. La télédétection fournit une couverture globale des principales caractéristiques de la surface du sol est une méthode très prometteuse pour l'estimation de son humidité de surface. Cependant, des études scientifiques doivent d'abord valider des modèles d'inversion et des algorithmes permettant de décrire et de comprendre la relation entre les données de télédétection et celles l'humidité du sol.

2. Estimation de l'humidité du sol par télédétection : état de l'art

L'utilisation de la télédétection a rendu possible les mesures de l'humidité de surface du sol sans contact avec celui-ci. Plusieurs approches ont été développées en utilisant les capteurs d'ondes électromagnétiques dans le domaine du visible (VIS), du proche infrarouge (PIR), de l'infrarouge thermique (IRT) et des microondes (ondes radar). Malgré que la télédétection ait été disponible depuis le début des années 1980, les domaines du spectre électromagnétique sensibles à l'humidité du sol doivent encore être étudiés pour une meilleure compréhension des différents paramètres et facteurs qui peuvent les affecter.

2.1. La télédétection satellitaire passive optique et infrarouge

Le domaine du visible fut le premier exploré. En se basant sur les concepts colorimétriques, les capteurs conçus permettaient d'étudier la réflectance de la cible, de définir sa signature spectrale, et d'établir le rapport avec ses propriétés et à ses caractéristiques. Par la suite, la mise en évidence du contraste entre le visible et le proche infrarouge, observé notamment sur la végétation verte, a permis une découverte qui avait de grandes retombées sur la télédétection civile. Différents « indices de végétation » ont été élaborés, permettant ainsi l'estimation des paramètres principaux des couverts végétaux (NDVI, LAI ... etc.).

Les recherches effectuées en utilisant le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique ont permis d'avoir plus de possibilités de discrimination des composants et des caractéristiques de la cible. Car les variabilités des spectres de réflectance observées dans ces domaines sont nettement plus élevées que dans le domaine du visible.

2.1.1. Généralités sur l'outil télédétection

Les capteurs de télédétection passifs utilisent le soleil comme source d'éclairement. Ils acquièrent des images en mesurant l'intensité du rayonnement qui leur parvient de la surface terrestre. Ce rayonnement provient d'une part du rayonnement propre de la Terre (en particulier l'IRT) et du rayonnement solaire réfléchi par la Terre (VIS, PIR et MIR).

Les caractéristiques spatiales, spectrales, radiométriques et temporelles des capteurs et des plateformes font que, avant de pouvoir extraire une information utile des images de télédétection, celles-ci sont soumises à deux types de traitement pour corriger les erreurs ou déformations dont elles sont entachées. Des corrections radiométriques et d'autres géométriques.

- Les corrections *radiométriques* comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Il existe plusieurs solutions pour tenter de corriger la radiométrie des images. Certaines sont basées sur des modèles mathématiques complexes décrivant les interactions principales. Ces modèles sont efficaces, mais leur application suppose que l'on connaisse les valeurs de certains paramètres (telle la composition de l'atmosphère) lors et au lieu de la prise de vue, ce qui est rarement possible.

D'autres méthodes de correction radiométriques se basent sur l'observation de cibles de référence dont on connaît la radiométrie.

- Les corrections *géométriques* comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre - capteur, de corriger l'effet du relief et des objets tridimensionnels à la surface de la terre (figure 2).

Dans le cas des données radar des distorsions particulières à ce genre de système viennent s'ajouter, comme par exemple les phénomènes de rapprochement (foreshortening) ou déversement (layover) etc.

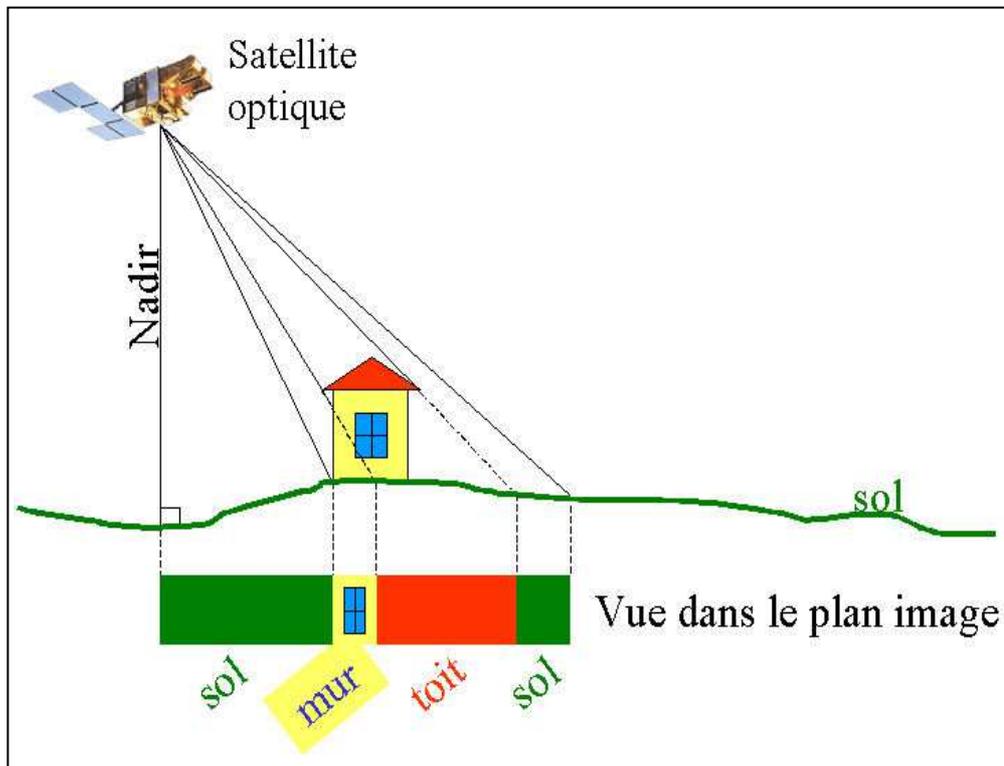


Figure 2. Distorsions géométriques dues au relief sur images optiques.

Les capteurs de télédétection sont caractérisés par les éléments suivants :

- la résolution spatiale (pouvoir de séparation des objets sur terre),
- la résolution spectrale (nombre et largeur des bandes spectrales mesurées),
- la résolution radiométrique (sensibilité du capteur à des valeurs proches d'intensité),
- la résolution temporelle (période de revisite de la même zone avec la même emprise).

2.1.2. Utilisation des images optiques et infrarouges pour l'estimation de l'humidité du sol en surface

Le principe est basé sur la mesure de la réflectance au niveau du sol dans les domaines du VIS et du PIR. En effet, l'accroissement de l'humidité de surface d'un sol réduit sa réflectance. Ainsi, sur une image satellitale, un sol humide apparaît plus foncé qu'un sol sec. Par ailleurs, les données de télédétection dans les domaines MIR et IRT sont utilisées pour l'estimation de la température de surface du sol. Cette température est la résultante des échanges d'énergie entre l'atmosphère et le sol, et elle peut être utilisée pour suivre le bilan hydrique du sol.

Thenkabail *et al.* (2000) ont déterminé les bandes VIS/PIR du spectre électromagnétique comme étant les plus sensibles à l'humidité du sol. Il s'agit du proche infrarouge (951 - 1000 nm), une portion du rouge (651 - 700 nm) et une portion du vert (501 - 550 nm). Par ailleurs, Bogonko (2005) a utilisé des données hyperspectrales du capteur HyMap et a trouvé une corrélation significative avec les mesures de terrain de l'humidité du sol pour les saisons où la végétation était courte, quand la végétation devient plus haute et dense, les valeurs du coefficient de corrélation « r^2 » montraient une relation non significative.

D'autres auteurs, notamment Alshikaili (2007), Verstraeten *et al.* (2006), Hejmanowska *et Mularz* (1996) ont utilisé des données de télédétection dans la bande IRT pour accéder à l'information sur l'humidité du sol en surface. Cependant, la méthodologie adoptée est relativement complexe et comporte plusieurs étapes. Le traitement des données IRT permet dans un premier temps d'extraire l'information sur l'inertie thermique. Ce paramètre caractérise la capacité du sol à résister aux changements de température ambiante. Il dépend de la porosité, de la texture et de l'humidité du sol. Les modèles d'inversion de l'humidité du sol à partir de l'inertie thermique utilisent des données climatiques pour améliorer la précision des valeurs estimées.

Malgré les résultats positifs obtenus, l'utilisation de la télédétection satellitaire passive pour l'estimation de l'humidité du sol reste très délicate et présente quelques inconvénients dont le plus important est l'absorption atmosphérique très difficile à corriger et qui fausse les valeurs de réflectance de la cible. La dépendance vis-à-vis du rayonnement solaire constitue également un facteur limitant, notamment en temps nuageux et pendant la nuit. Aussi, l'application n'est valable que pour un sol nu ou en présence de végétation très basse et éparse afin que le rayonnement puisse atteindre la surface du sol. C'est pour ces raisons que l'on a recours aux techniques de la télédétection active, ou radar.

2.2. La télédétection radar

Le domaine des hyperfréquences offre la possibilité de représenter et de différencier certaines caractéristiques qui ne peuvent être discernées par les capteurs visibles et infrarouge. Les principales applications actuelles de la télédétection radar sont : *l'étude de l'humidité du sol* et de la *biomasse végétale*, *Le suivi des glaciers* et des *océans* (la salinité, les vagues...etc.), *Les structures géologiques*.

La plupart des satellites radar imageurs ont la capacité d'acquérir des images de même qualité quelles que soient les conditions climatiques (nébulosité, temps nuageux ... etc.). Par conséquent, ces systèmes offrent un potentiel d'acquisition d'images exploitable pour la cartographie de l'humidité du sol pendant toutes l'année. C'est pourquoi, au regard de l'objectif d'exploitation des images satellitaires pour l'étude de l'humidité du sol, il a été choisi de présenter les systèmes radar et en particulier le radar à synthèse d'ouverture (RSO) de façon plus détaillée.

2.2.1. le radar, définition et principe

Le terme radar est l'acronyme de "*Radio Detection And Ranging*" (détection et télémétrie par onde radio). Son principe fondamental est l'émission d'ondes électromagnétiques dans le domaine des hyperfréquences puis la réception du signal rétrodiffusé. Le capteur enregistre l'intensité et le temps écoulé entre l'émission et la réception des signaux. Les ondes "rétrodiffusée", par leurs caractéristiques propres (fréquence, polarisation), transportent des informations acquises au moment de leur interaction avec la surface cible.

Les satellites radar opèrent dans le domaine des hyperfréquences (ou microondes). La présence d'une source d'illumination contrôlée permet l'acquisition des images de jour comme de nuit, avec ou sans couverture nuageuse. En effet, dans ce domaine du spectre électromagnétique,

le signal n'est quasiment pas perturbé par l'atmosphère. La transmission est proche de 100% entre 1 et 20 GHz en l'absence de gouttes de pluies.

Le domaine des microondes comprend des longueurs d'onde comprises 1mm et 1m (tableau 2), mais la plupart des satellites radar imageur utilisent des signaux en bande X (TerraSAR), C (Envisat, ERS et RADARSAT) ou L (ALOS).

Tableau 2. Fréquences et longueurs des microondes.

Bandes	Longueur d'onde λ (cm)	intervalle de Fréquences (GHz)
Ka	0,83 - 1,36	22 – 36
Ku	1,36 - 2,7	10,9 – 22
X	2,7 - 5,2	5,75 - 10,9
C	5,2 - 7,1	4,2 - 5,75
S	7,1 - 19,3	1,55 - 4,2
L	19,3 - 76,9	0,39 - 1,55
P	76,9 - 133	0,225 - 0,39

2.2.1.1. Les types de radar

En fonction des informations qu'ils doivent fournir, les radars sont équipés de technologies différentes. Ils possèdent chacun ses propres caractéristiques (conditions et principe de fonctionnement, mode d'acquisition, niveau de prétraitement, possibilités de configuration ... etc.).

- Il existe deux types de radar : le radar imageur et le radar non imageur. Le premier permet de présenter sous forme d'image l'objet (ou la zone) observé, alors que le deuxième mesure uniquement le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal. Les radars imageurs sont utilisés pour cartographier la Terre, les autres planètes, les astéroïdes et les autres objets célestes. Ils offrent la capacité d'identification et de classification des cibles. Par ailleurs, les radars non imageurs sont dédiés à la mesure de grandeurs physique ne donnant pas lieu de façon directe à une image. C'est par exemple le cas du radar altimétrique (TOPEX-POSEIDON) ayant pour vocation de déterminer précisément l'altitude du satellite au dessus de la surface terrestre, au cours de sa progression, ou encore les cinémomètres radars (sur le bord des routes).

- L'application pour l'étude de l'humidité du sol nécessite l'utilisation du radar imageur. Selon la présence ou pas d'une source d'illumination sur le satellite, on distingue deux types : les systèmes actifs et les systèmes passifs.

Les systèmes actifs : ce sont les plus utilisés dans les travaux de recherche de nos jours. Les capteurs possèdent leur propre source d'émission d'ondes électromagnétiques vers les surfaces à étudier. La puissance du signal est nettement plus importante par rapport aux systèmes passifs. De plus, une compression d'impulsion ou encore une modulation de fréquence « synthèse d'ouverture » permet d'améliorer de façon considérable la résolution spatiale.

Les systèmes passifs : ils reçoivent l'émission naturelle des cibles dans le domaine des hyperfréquences. L'intensité de ces émissions étant très faible, elle ne donne pas une bonne résolution spatiale pour des études de pointe (> 10km). Ces capteurs sont utilisés généralement pour des études hydrologiques et climatiques (Njoku et Entekhabi, 1994).

2.2.1.2. Le radar à synthèse d'ouverture (RSO)

C'est un radar actif à visée latérale produisant une image à haute résolution de la surface terrestre à partir de l'information enregistrée sur l'intensité du signal microonde reçu par rapport au signal émis.

2.2.1.2.1. Le principe d'acquisition du radar à visée latérale

Un radar peut opérer globalement selon deux modes : en visée verticale et en visée latérale (figure 3). Un radar fonctionnant en visée verticale ne peut discriminer les points A et B car l'écho revient au même instant au capteur du satellite. Les points A et B se trouvent alors géographiquement confondus. La visée radar verticale concerne les mesures altimétriques.

Pour obtenir des images radar, il est nécessaire d'opérer en visée latérale. Dans ce cas, si un paquet d'impulsions est émis de l'antenne, sa rétrodiffusion par "B" reviendra plus tard que sa rétrodiffusion par "A". A et B peuvent être géographiquement séparés.

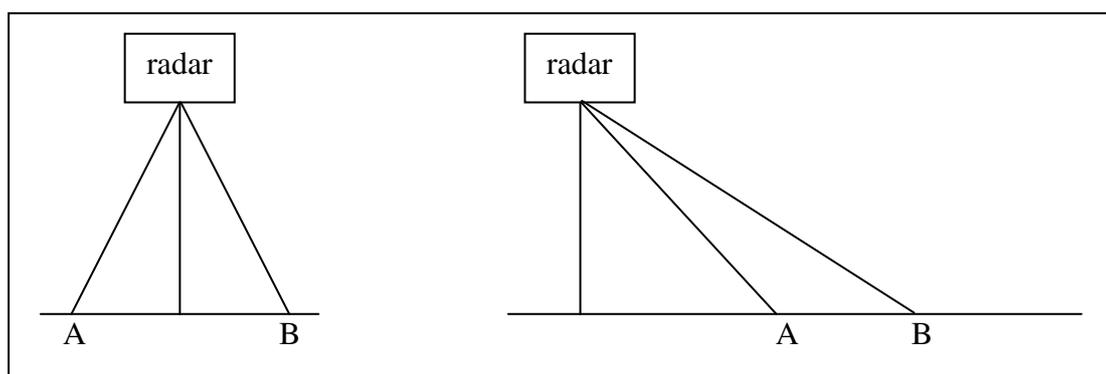


Figure 3. Visée verticale et visée latérale.

Les impulsions sont émises par l'antenne perpendiculairement à la trajectoire du porteur, en visée oblique, suivant un angle θ appelé angle de visée. Les réflecteurs, à la surface de la terre sont localisés grâce à leur distance à l'antenne qui est calculée à partir du temps d'aller-retour de l'onde radar et de la vitesse de propagation des ondes radar dans l'atmosphère. La répétition des impulsions assure le balayage azimutal (dans la direction de déplacement de l'antenne). Ainsi, des bandes continues de la surface terrestre sont illuminées d'un côté du radar, parallèlement à sa trajectoire (figure 4). Les données accumulées sont ensuite traitées afin de produire une image radar.

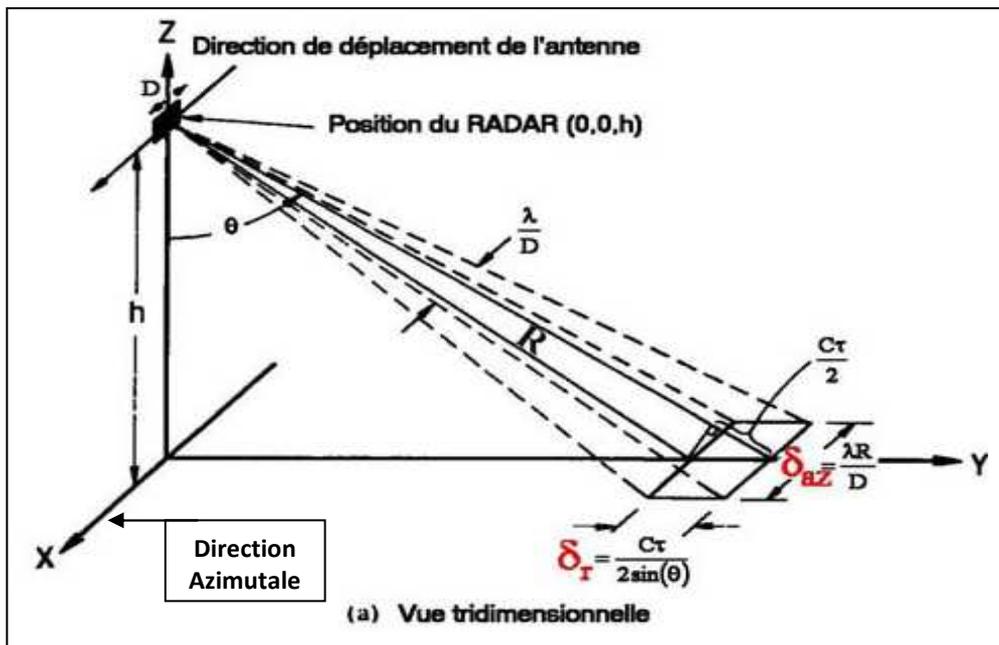


Figure 4. Radar latéral et résolution spatiales (Ulaby *et al.*, 1982)

La résolution radar se définit selon les deux directions, en azimut et en portée.

- La résolution azimutale (δ_{az}) est proportionnelle à l'ouverture angulaire du lobe de l'antenne (rapport de la longueur d'onde λ du signal émis par la longueur D de l'antenne)
- alors que la résolution radiale (δ_r) dépend de la durée des impulsions.

Par conséquent, une résolution azimutale fine (de l'ordre de 10m par exemple) nécessite une antenne de longueur importante (4km), ce qui est physiquement impossible sur une plateforme spatiale. Par ailleurs, une résolution radiale fine impose une durée d'impulsion très petite, donc une puissance d'émission importante.

2.2.1.2.2. Amélioration de la résolution spatiale

Pour éviter l'emploi d'antennes très grandes et très puissantes, deux méthodes sont employées dans les techniques satellitaires radar actuelles : la compression d'impulsion et la synthèse d'ouverture.

* **La compression d'impulsion** : C'est l'émission d'une onde fortement modulée en fréquence. Cette modulation permet d'éclairer simultanément deux réflecteurs voisins avec des signaux de fréquences différentes, et donc les discriminer. Le signal est ensuite traité par un filtre adapté qui a la particularité d'augmenter son intensité par rapport au bruit.

* **La synthèse d'ouverture** : Il s'agit d'un traitement numérique (informatique) des données radar, c'est une modulation en fréquence qui peut être obtenue par le biais du mouvement du porteur et de l'effet Doppler en azimuth. Cette modulation doit être accompagnée d'un filtre adapté à la réception, exactement comme pour la compression d'impulsions en distance (figure 5).

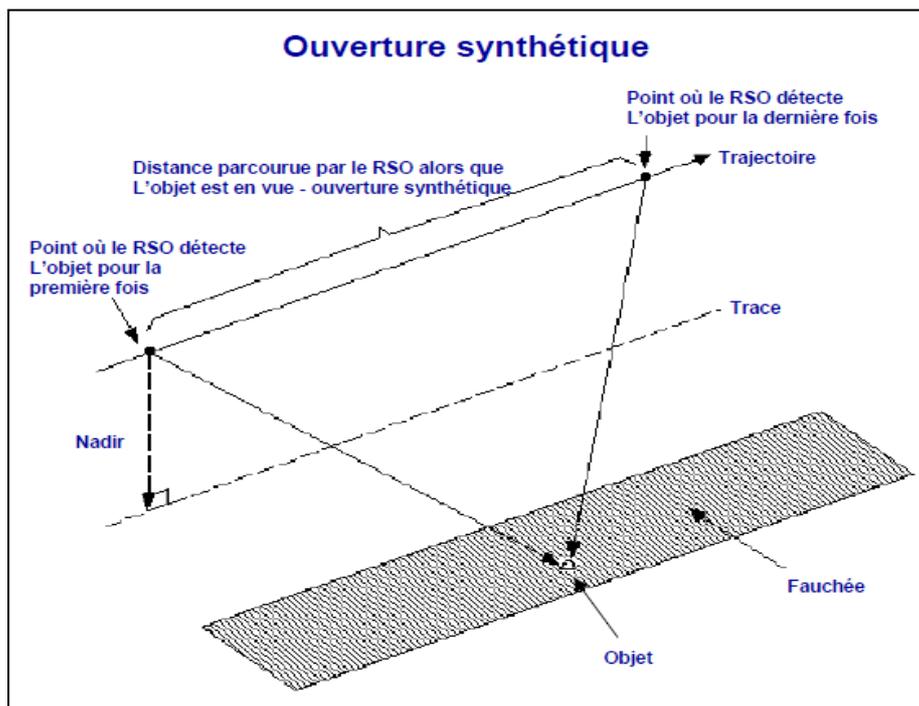


Figure 5. Concept de la synthèse d'ouverture (Centre Canadien de Télédétection, 2002).

La longueur de l'antenne est simulée par le traitement d'un grand nombre de signaux réfléchis par la cible tout au long de la trajectoire du vol. Ce traitement permet d'affiner l'ouverture de l'antenne. On parle donc de synthèse d'Ouverture (Barbier, 1996 in Walker, 1999), d'où le nom de ce type de système.

2.2.1.3. Radiométrie sur les images radar

2.2.1.3.1. Calibration radiométrique des images radar

L'information enregistrée pour chaque pixel d'une image n'est pas la rétrodiffusion radar, mais une information discrète appelée compte numérique. Pour estimer les coefficients de rétrodiffusion à partir des comptes numériques, plusieurs relations peuvent être employées. Ces relations, propres à chaque capteur, utilisent des constantes de calibration du système radar. Généralement, ces dernières sont fournies dans le fichier d'en-tête de l'image (données descriptives).

La rétrodiffusion est exprimée soit :

- par unité de surface en distance temps « β^0 »,
- par unité de surface en distance au sol « σ^0 »,
- par unité de surface dans le plan du front d'onde incident (perpendiculaire à la distance temps) « γ^0 ».

2.2.1.3.2. Le chatoiement (ou « Speckle »)

Les images radar sont soumises aux effets du chatoiement, appelé aussi scintillement. C'est un bruit inhérent à tous les systèmes qui émettent des ondes cohérentes et se traduit sur les images par un aspect granulaire dû aux interférences aléatoires des ondes cohérentes émises par le radar sur une surface rugueuse. Les effets du chatoiement peuvent s'avérer préjudiciables pour l'analyse thématique fine des images radar. Pour limiter ces effets, deux méthodes de traitement des images radar sont fréquemment employées : le filtrage spatial et le filtrage temporel. La qualité de ces traitements peut s'évaluer à leur capacité à :

- lisser le plus possible les zones homogènes.
- préserver fidèlement la valeur moyenne de la réflectivité radar de façon à ce qu'elle puisse toujours servir à identifier une zone de l'image.
- préserver, autant que possible, la texture.
- conserver, tout en les filtrant, les structures de l'image (contours, lignes).
- limiter la perte de résolution spatiale.

* **Le filtrage spatial** : est une fonction mathématique qui s'applique sur une seule image radar. Ils sont nombreux et plus ou moins complexes. Les filtres les plus simples (médiane ou moyenne) consistent à remplacer la valeur de rétrodiffusion d'un pixel par la médiane ou

la moyenne des rétrodiffusions dans un voisinage donné. La taille du voisinage est définie par la taille de la fenêtre glissante utilisée pour le filtrage. Des filtres plus évolués, dits adaptatifs, modifient la méthode de calcul selon les statistiques locales de la rétrodiffusion dans un voisinage donné (fenêtre mobile) du pixel considéré (Jingfeng *et al.*, 2003 in Hostache, 2006). Parmi ceux-ci, il est possible de citer les filtres adaptatifs de Lee (Lee, 1980), Frost (Frost *et al.*, 1982), et Gamma cartographique (Lopes *et al.*, 1993; Lopes *et al.*, 1990).

Ces filtres spatiaux sont efficaces pour réduire l'effet du chatoiement et améliorer la résolution radiométrique, mais ils ont comme effet indésirable une dégradation de la résolution spatiale. Cette dégradation est relative à la taille de la fenêtre mobile utilisée.

Il est préférable d'utiliser les filtres adaptatifs (p. ex. filtre gamma cartographique) pour réduire le chatoiement sur une image radar plutôt que d'utiliser les filtres non-adaptatifs. Les premiers tiennent compte des propriétés locales de rétrodiffusion du terrain et de la nature du capteur, ce qui n'est pas le cas pour les filtres non-adaptatifs. La figure 6 montre une comparaison entre les différents types de filtres (médian, moyenne, Lee, Frost et gamma Map).

*** *Le filtrage temporel* :** Le filtrage temporel peut être appliqué sur au moins deux images radar ayant des caractéristiques d'acquisition similaires (polarisation, angle d'incidence, orbite ascendante ou descendante). Ces filtres consistent généralement à calculer une moyenne pondérée pixel à pixel (ou sur une fenêtre mobile) des valeurs de rétrodiffusion sur les images disponibles. Contrairement au filtrage spatial, le filtrage temporel ne dégrade pas la résolution spatiale initiale des images.

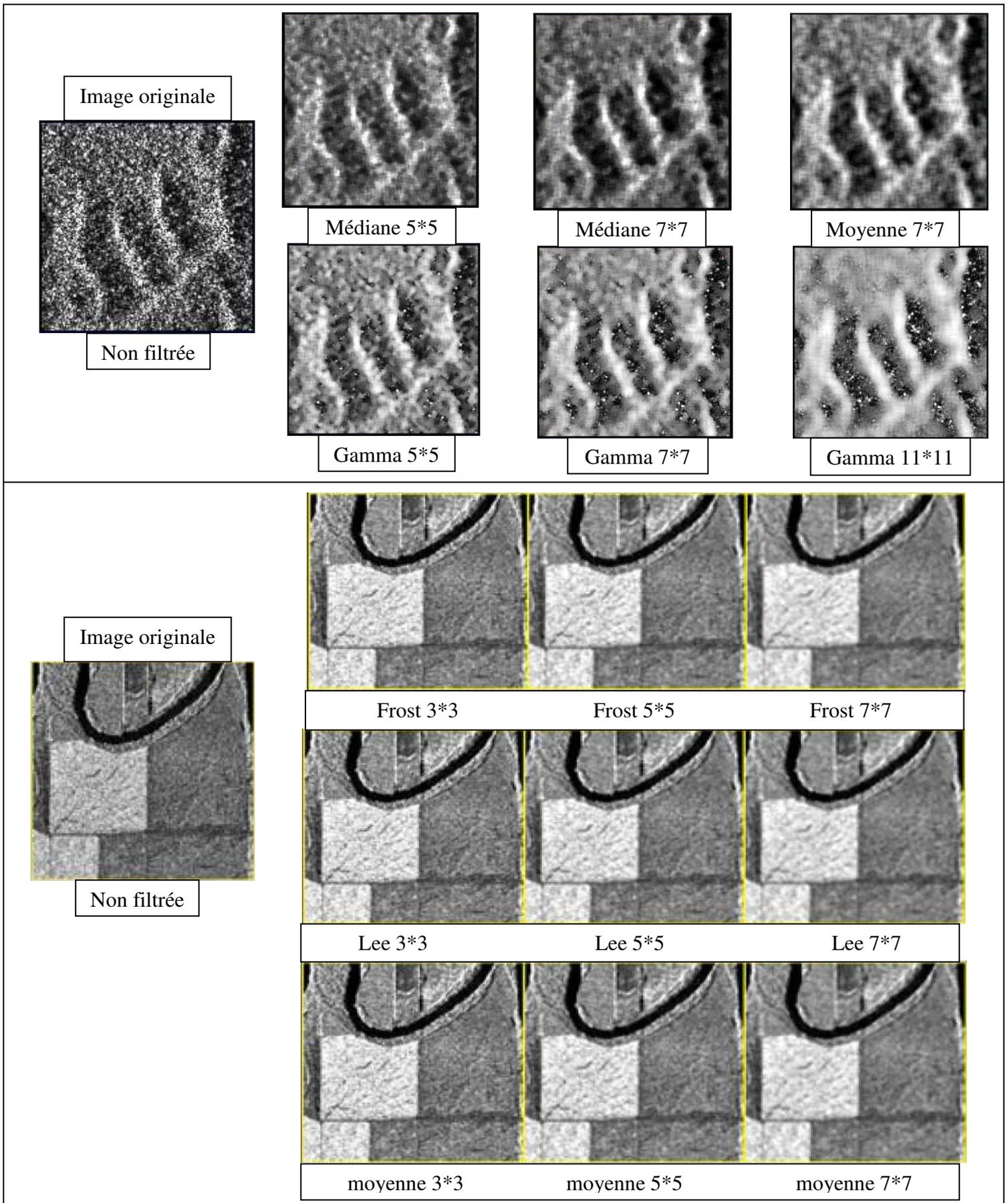


Figure 6. Filtres adaptif (Frost, Lee, gamma map) et filtre non-adaptif (moyenne et médiane).

2.2.1.4. Facteurs influençant le signal radar

- **La rugosité de surface**

La rugosité de surface est la variation aléatoire de la hauteur de surface par rapport à une surface de référence. Elle est représentée par l'écart-type des variations de hauteur de la surface et la longueur de corrélation.

Dans le cas d'un réflecteur rugueux, une part du signal émis par l'antenne est réfléchi vers celle-ci (figure 7). Plus la surface du réflecteur est rugueuse, plus le signal rétrodiffusé sera important. Des recherches ont montré que l'influence de la rugosité de surface sur le signal rétrodiffusé est du même ordre ou supérieure à l'influence de l'humidité du sol (Wanger *et al.*, 2007). Ainsi, il est important de modéliser de façon adéquate le signal rétrodiffusé par une surface rugueuse naturelle d'un sol. Théoriquement, ceci est possible en résolvant l'équation de Maxwell, mais vu la complexité de forme d'une surface naturelle, une solution mathématique exacte n'est pas faisable (Wanger *et al.*, 2007).

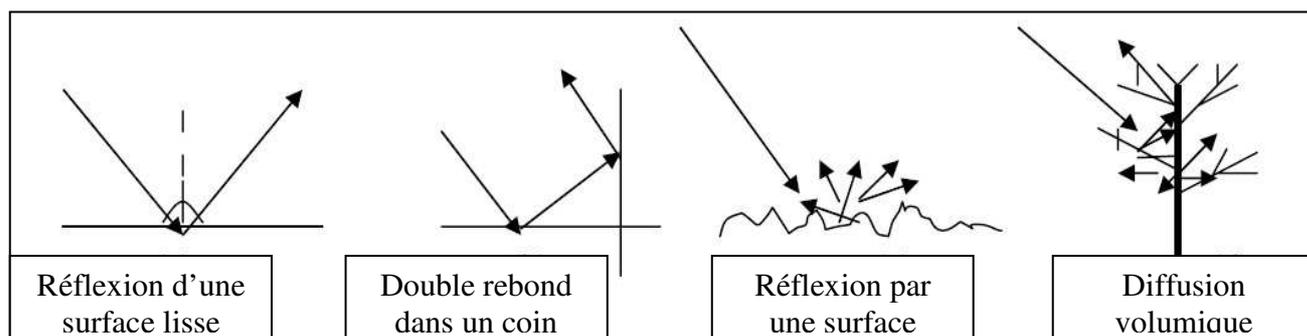


Figure 7. Exemples des mécanismes de rétrodiffusion (ESA, 2007).

- **Le couvert végétal**

Le coefficient de rétrodiffusion du signal radar est également influencé par le contenu en eau des végétaux ce qui cause souvent une surestimation de l'humidité du sol. Des corrections sont nécessaires pour tenir compte de cet effet (Friesen, 2008).

- **la longueur d'onde**

La transparence de l'atmosphère vis à vis du signal radar et la profondeur de pénétration des ondes émises augmente d'autant plus que la longueur d'onde (λ) est plus importante (figure 8). Dans le cas des satellites radar imageurs, utilisant les bandes X, C et/ou L, la transparence de l'atmosphère est assez bien marquée, et la profondeur de pénétration varie entre 1 et 20 cm selon l'humidité du sol.

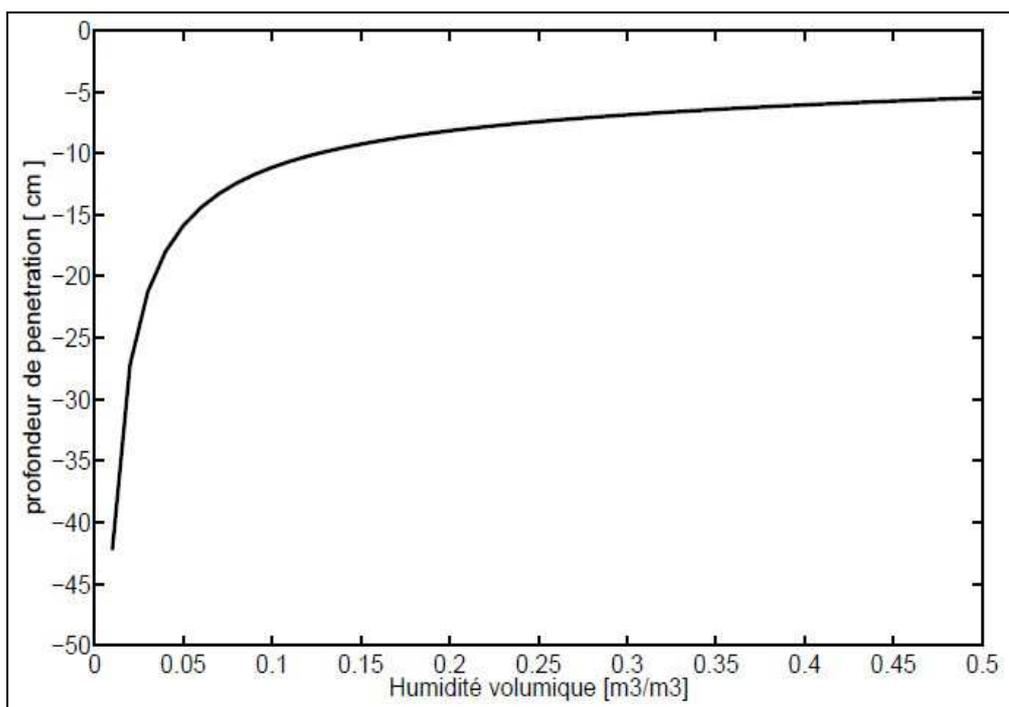


Figure 8. Profondeur de pénétration calculée en fonction du contenu en eau dans le sol pour le site SMOSREX (Escorihuela, 2006).

- *la polarisation*

La polarisation est définie comme l'orientation du vecteur électrique d'une onde électromagnétique. Les antennes d'un système radar peuvent être configurées de façon à émettre et à capter un rayonnement électromagnétique polarisé horizontalement ou verticalement.

Une polarisation VV (verticale en émission et en réception) implique une sensibilité plus marquée du radar aux objets verticaux. Au contraire en polarisation HH (horizontale en émission et en réception), les objets verticaux sont plus transparents vis à vis du signal radar.

- *l'angle d'incidence*

Selon Ulaby et Dobson (1989), Le coefficient de rétrodiffusion est inversement proportionnel à la variation de l'angle d'incidence (figure 9). Cette même tendance est observée avec une légère différence pour la polarisation verticale (VV), la polarisation horizontale (HH) et la polarisation croisée (HV ou VH).

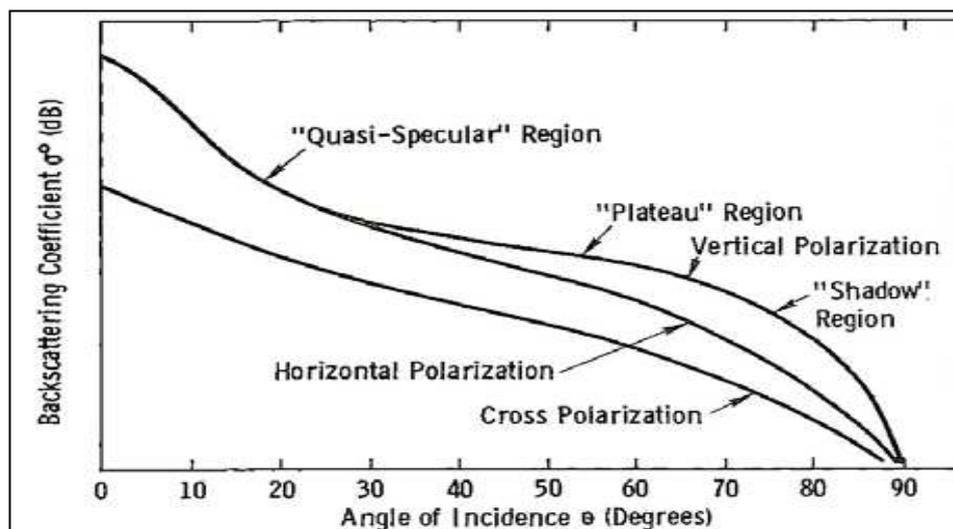


Figure 9. Comportement du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de l'angle d'incidence (Ulaby et Dobson, 1989).

2.2.1.5. Les principaux satellites radar imageurs

Sur le tableau 3, nous retrouvons les principaux satellites RSO depuis 1978 jusqu'à aujourd'hui.

Tableau 3. Principaux satellites RSO actuels et anciens (Hostache, 2006).

Nom	Origine	Année de lancement	Bande spectrale	Polarisation	Angle de visée (°)	Fauchée (km)	Résolution spatiale (m)	Période de revisite (j)
SEASAT	USA-Japon	1978	L (23,5 cm)	HH	~20	100	~25	-
Almaz	Russie	1991	S (9,6 cm)	HH	30-60	25-300	10-15	-
Jers-1	Japon	1992	L (24 cm)	HH	~35	75	~18	-
ALOS		2006	L (23,5 cm)	HH-HV-VH-VV	8-60	40-350	7-100	46
ERS-1 et 2	Europe	1991 et 1995	C (5,6 cm)	VV	~23	100	~25	3-35
ENVISAT (ASAR)		2002	C (5,6 cm)	HH-HV-VH-VV	15-45	56-400	30-2000	3-23
RADARSAT-1	Canada	1995	C (5,6 cm)	HH	10-59	50-500	10-100	3-24
RADARSAT-2		2007	C (5,5 cm)	HH-HV-VH-VV	20-50	20-100	3-100	3-24
TerraSAR	Allemagne-Europe	2006	X (3 cm)	HH-HV-VH-VV	15-60	5-100	1-100	2,5-11
COSMO-SKYMED (4 satellites)	Italie-Europe	2007	X (3,1 cm)	HH-HV-VH-VV	20-60	10-100	1-100	1/8-10

2.2.2. Principe de l'estimation de l'humidité du sol par télédétection radar

Le radar émet des impulsions microondes (hyperfréquences) vers la cible, c'est-à-dire le sol, et enregistre le signal rétrodiffusé par cette même cible. La comparaison des caractéristiques du signal rétrodiffusé avec celles du signal émis (fréquence, polarisation) permet de calculer le coefficient de rétrodiffusion. Ce coefficient est lié aux caractéristiques diélectriques de la cible qui sont souvent exprimées par la constante diélectrique complexe. Cette constante traduit le caractère conducteur et réflectif de la cible. Pour la plupart des milieux naturels secs, les constantes diélectriques rencontrées sont de l'ordre de 3 à 8, alors que celle de l'eau est de l'ordre de 80. Par conséquent, une augmentation de la teneur en eau d'une cible, par exemple d'un sol entraîne un accroissement de la rétrodiffusion.

Le principe paraît simple, mais il y'a d'autres paramètres que l'humidité du sol qui influencent la rétrodiffusion radar. Il s'agit des caractéristiques de la cible (la rugosité de surface, l'intensité du couvert végétale ... etc.) ainsi que les propriétés du capteur lui même (la longueur d'onde, la polarisation, l'angle d'incidence).

2.2.2.1. Choix de la configuration du capteur

Vu la sensibilité de la rétrodiffusion à la rugosité de surface et au couvert végétal, et l'effet variable des différentes combinaisons de fréquence, de polarisation et d'angle d'incidence, beaucoup de travaux de recherche ont été consacrés à la discussion de la configuration "optimale" des satellites RSO pour des applications à l'étude et au suivi de l'humidité du sol en surface. Les recommandations qui ont été faite dans la littérature varient d'un auteur à un autre. Quelques exemples seront brièvement cités ci-dessous.

Pour minimiser les effets de la rugosité de surface qui peuvent souvent dominer sur les images RSO dans des parcelles agricoles, Normand (1991) a considéré que la configuration "optimale" est celle qui utilise une fréquence entre 4 à 8 GHz (bande C) en polarisation HH et un angle d'incidence entre 10° et 20°. Ceci est presque en accord avec la recommandation faite par Ulaby et Batliva (1976) qui ont proposé une configuration optimale utilisant une polarisation HH ou VV en bande C et un angle d'incidence entre 7° et 15° pour minimiser les effets de la rugosité de surface.

Il a été noté que l'utilisation des canaux co-polarisés (i.e. même polarisation émise et reçue) et leurs combinaisons linéaires est le meilleur choix pour l'estimation de l'humidité du sol, car cette configuration est la plus sensible aux changements de l'humidité et la moins sensible au couvert végétal et à la précision de la calibration (Shi *et al.*, 1997). Il apparaît donc que l'utilisation du satellite ERS, caractérisé par un angle d'incidence de 23° et une polarisation VV en bande C permet de minimiser les effets de la rugosité de surface et de la végétation (Dobson *et al.*, 1992 ; Moran *et al.*, 1998).

Par ailleurs, pour des canaux en polarisations croisées (p. ex. HV ou VH), quelques études montrent que l'effet de la rugosité de surface diminue (Bradley et Ulaby, 1981 ; Blanchard *et al.*, 1982) et que la sensibilité aux changements de l'humidité augmente (Hirosawa *et al.*, 1978). Mais selon Holah *et al.* (2005), les polarisations HH et HV sont plus sensibles à la rugosité de surface que la polarisation VV. Ces résultats n'ont pas été confirmés par Baghdadi *et al.*, (2008), ils avaient étudié une base de données d'images RSO des satellites ERS-2, RADARSAT-1 et Envisat et ont découvert que la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol n'était pas très dépendante de la polarisation.

Mise à part la configuration du capteur radar, Schmugge (1985) a démontré que le coefficient de rétrodiffusion dépend plus de l'état de l'eau dans le sol que du taux d'humidité. Ainsi, par l'expression de la teneur en eau en pourcentage de la capacité de rétention (CR) au lieu d'un rapport volumique, l'effet de la rugosité sur le coefficient de rétrodiffusion radar est minimisé.

2.2.2.2. Méthodes et approches utilisées pour l'estimation de l'humidité du sol

Les chercheurs travaillant sur ce sujet abordent souvent la question de la configuration radar optimale (la longueur d'onde, la polarisation et l'angle d'incidence) à utiliser pour obtenir la meilleure estimation possible de l'humidité du sol, tout en minimisant les effets des autres facteurs influençant le signal radar.

D'autres travaux ont pour objectif la validation de modèles mathématiques propres aux capteurs d'ondes électromagnétiques utilisés, ou bien la comparaison des différentes approches existantes pour déterminer celle qui donne les meilleurs résultats.

L'approche adoptée varie donc selon les objectifs recherchés, les moyens mis en œuvre et le contexte de l'étude. Une large gamme de modèles, allant d'une relation expérimentale vers les modèles empiriques et semi-empiriques jusqu'aux modèles basés sur une approche purement physique, est utilisé pour estimer l'humidité du sol à partir du signal radar.

2.2.2.2.1. Approche de détection des changements

Cette approche part du principe que les changements dans le temps de la rugosité de surface sont faible ou nuls. Les variations du coefficient de rétrodiffusion seront dues aux changements de l'humidité du sol en surface. Une bonne calibration relative est nécessaire, et les images doivent être acquises en utilisant la même configuration du capteur radar (emprise, polarisation, angle d'incidence, mode, résolution, passage ... etc.). Cette approche donne uniquement des résultats relatifs, sauf si elle est calibrée avec de bons résultats de terrain.

Moran *et al.* (1998) ont évalué la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion du signal radar à synthèse d'ouverture ERS-2 en bande C vis-à-vis l'humidité du sol en milieu semi-aride. Ils ont testé une approche basée sur des mesures de télédétection optique (Landsat TM) et radar (ERS-2 SAR) pour améliorer l'estimation de l'humidité du sol au niveau régional.

Dans cette étude, les trois sites choisis étaient relativement plats pour minimiser l'effet de la topographie, et la végétation était plus ou moins homogène. Une série de six images RSO du satellite ERS-2 (en bande C) et six images en mode optique (Landsat TM en couleurs composites) prises pendant une période de six mois a permis le suivi de l'humidité du sol et d'avoir une large gamme de variation. La relation entre le coefficient de rétrodiffusion RSO et l'humidité du sol a été prouvée par le test de corrélations linéaires simple.

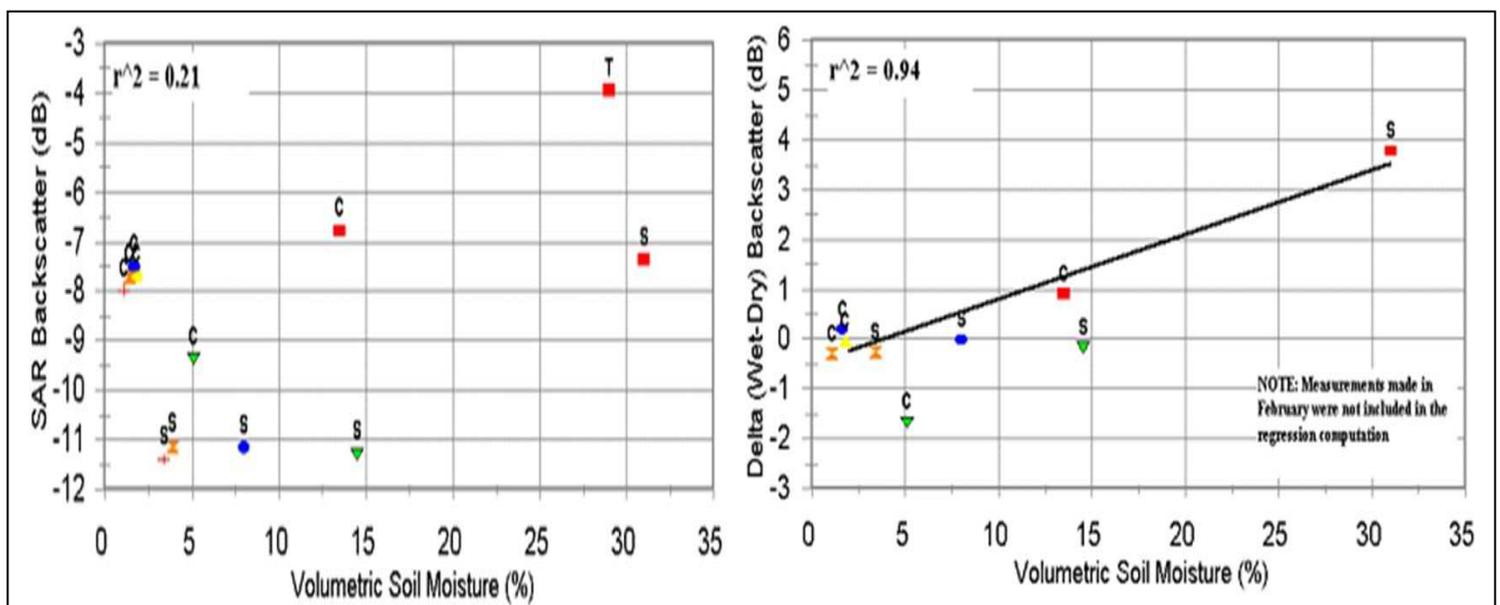


Figure 10. Relation entre le coefficient de rétrodiffusion (ERS-2) et l'humidité du sol à 5cm en considérant 3 sites notés C, S et T et 6 dates de janvier à septembre 1997 (Moran et al., 1998).

Les graphes de la figure 10 montrent que le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) n'était pas corrélé avec l'humidité de surface du sol dans les trois sites ($r^2 = 0,21$). Mais par soustraction de la

valeur du coefficient de rétrodiffusion de la saison sèche ($\sigma_{\text{humide}}^0 - \sigma_{\text{sec}}^0$), le mois de Juin dans le cas de cette étude. Les données ont été corrigées vis-à-vis de l'effet de la rugosité de surface et de la végétation en même temps. La corrélation entre σ^0 corrigé (humide – sec) et l'humidité de surface du sol était bonne pour les trois sites ($r^2 = 0,94$). D'autre part, la relation entre « $\sigma^0 - \sigma_{\text{dry}}^0$ » et l'indice de la surface végétale ou surface foliaire (PAI) calculé à partir des images Landsat TM indique une variation non significative. L'effet de la végétation n'était donc pas important en raison de la présence d'un couvert végétal naturel dispersé dans les trois sites. Finalement, l'utilisation de la relation entre « $\sigma^0 - \sigma_{\text{sec}}^0$ » et l'humidité de surface mesurée au laboratoire « θ_s » pour les trois sites expérimentaux a permis d'obtenir des cartes régionales de l'humidité du sol en surface (figure 11).

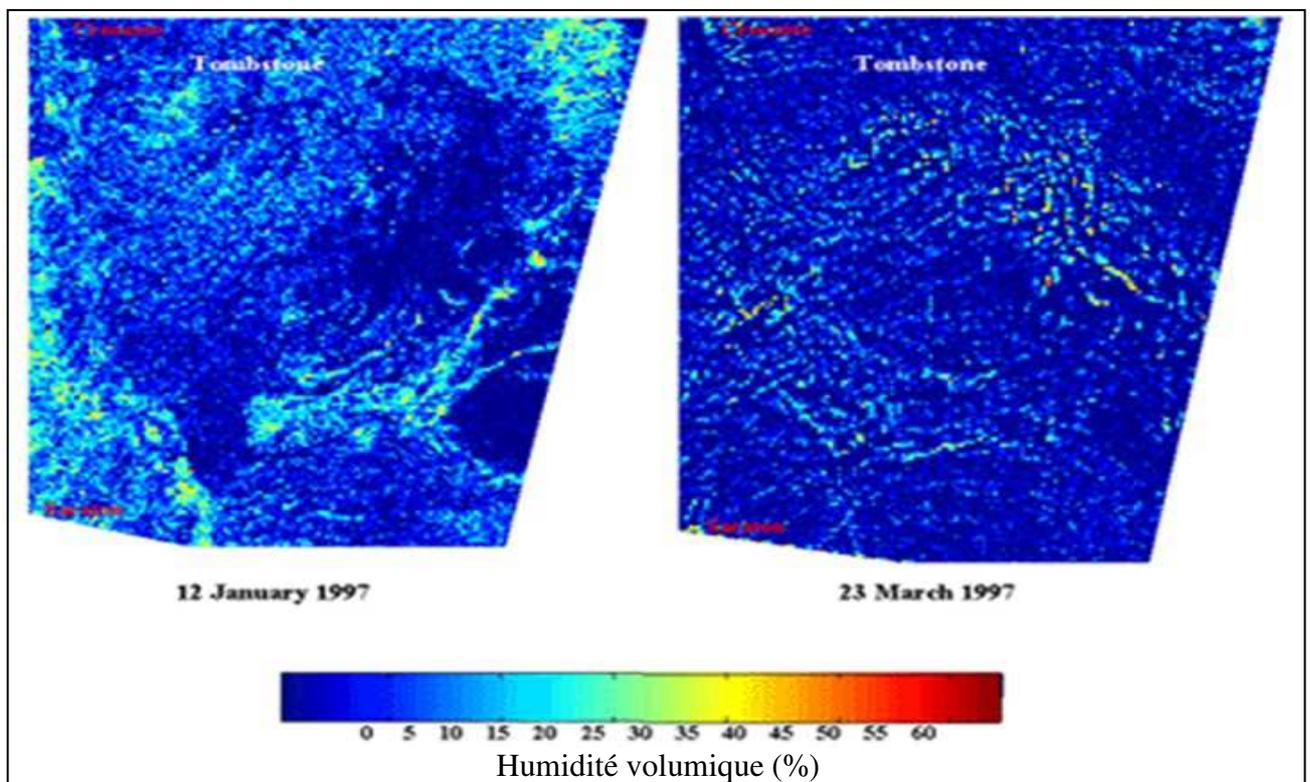


Figure 11. Distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dérivées des images RSO (Moran et al., 1998).

D'autres travaux notamment ceux de Zribi *et al.* (2011) ; Pathe *et al.* (2009) ; de Wang *et al.* (2004) ont utilisé l'approche de détection des changements pour la correction de l'effet de la rugosité de surface. La corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité volumique du sol en surface (mesurée au laboratoire) était significative (figure 12)

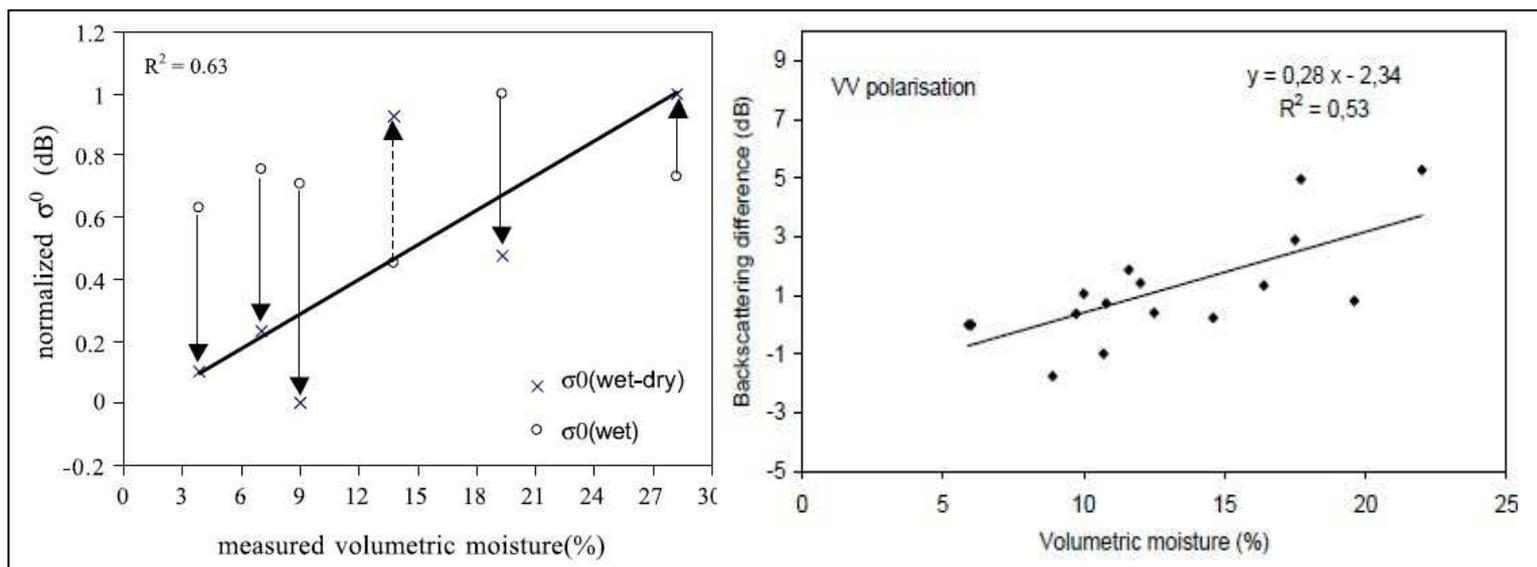


Figure 12. Relation entre le coefficient de rétrodiffusion corrigé et l'humidité volumique du sol en surface (à gauche : Wang et al., 2004 et à droite Zribi et al., 2011)

2.2.2.2.2. Modèles semi-empiriques (ex. : model de Dubois et model de Oh)

La rétrodiffusion du signal radar est liée aux caractéristiques du capteur (fréquence, angle d'incidence, polarisation) et celles de la cible (propriétés diélectriques et rugosité). Les coefficients sont dérivés à partir de travaux extensifs de terrain (utilisant la plupart du temps des mesures du diffusomètre). Les paramètres du capteur sont connus et deux équations sont résolues généralement pour la constante diélectrique et la rugosité en utilisant des données radar en multi-angle et multi-polarisation. Ces modèles intègrent un seul paramètre de la rugosité du sol, c'est l'écart-type des variations de hauteur de la surface (la longueur de corrélation est ignorée). Enfin, ces modèles d'inversion sont plus ou moins faciles à utiliser mais leur validité est limitée.

Escorihuela, (2006) a utilisé des données radiométriques en bande L (1,4 GHz) pour une cartographie globale de l'humidité du sol. Un modèle semi-empirique a été testé et corrigé vis-à-vis de l'effet de la rugosité pour un sol nu, ensuite vis-à-vis de l'effet du couvert végétal en tenant compte de la particularité de la configuration SMOS, notamment la diversité d'angles d'incidence et de polarisation.

Premièrement, l'estimation de l'influence de la température sur la constante diélectrique de l'eau liée a permis d'avoir une mesure plus précise du contenu en eau du sol à partir des données des capteurs. Cette étape est indispensable à franchir avant d'aborder la modélisation de l'émission.

Deuxièmement, un modèle de transfert radiatif pour un sol nu rugueux a été mis en évidence pour être directement applicable pour l'inversion de l'humidité du sol à partir des données SMOS. Les résultats montrent qu'en polarisation verticale, les effets de la rugosité augmentent avec l'angle d'incidence, et en polarisation horizontale ils diminuent. Le modèle utilise un seul paramètre « h » (paramètre de rugosité) qui dépend de l'humidité du sol et l'évaluation sur une période de deux ans a permis de conclure que les valeurs inversées de l'humidité du sol avaient une très bonne précision. Finalement, les effets du couvert végétal, de la couche de litière et de la rosée sur l'émission ont été étudiés. Les résultats obtenus montrent d'une part, que la modélisation utilisée (réalisée par Saleh *et al.*, 2006) sous-estime les variations journalières, ce qui est probablement due à l'importance du cycle journalier sur la litière dans le site d'étude, et d'autre part, un résultat important pour la mission SMOS est que les effets directs de la rosée sur le signal sont négligeables mais pour le site d'étude, la rosée n'est observable que par l'humidification de la couche de litière.

L'utilisation du modèle corrigé final donne de très bons résultats. Le coefficient de corrélation r^2 était supérieur à 95% (figure 13)

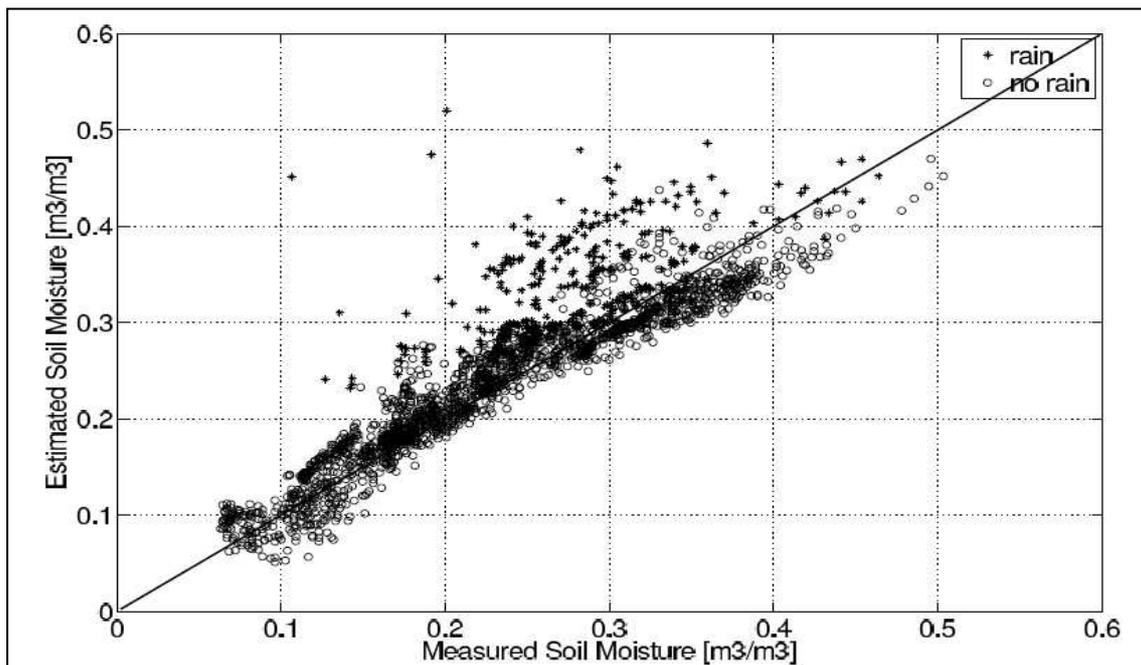


Figure 13. Comparaison entre l'humidité de la surface du sol estimée et celle mesurée, de Janvier 2004 à Octobre 2005 (Escorihuela, 2007).

Le modèle utilisé pour générer l'algorithme d'inversion dans l'étude de Monerris (2009) a donné des résultats satisfaisants pour la mission SMOS (figure 14). L'erreur trouvée pour les valeurs estimées de l'humidité du sol était de 2,3%, elle est inférieure au seuil de précision exigé pour la cartographie (4%).

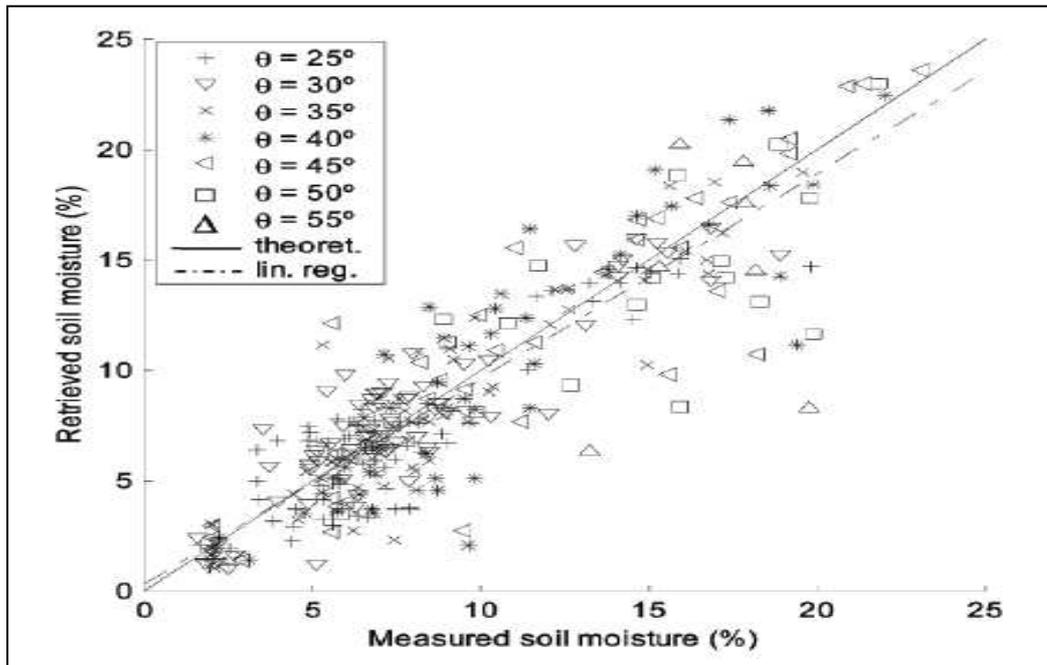


Figure 14. Comparaison des valeurs de l'humidité du sol estimée et mesurée (Monerris, 2009)

D'Urso et Minacapilli (2006) ont utilisé le model de Oh et comparé les valeurs estimées aux valeurs mesurées de la constante diélectrique du sol en bande L et en bande C. Les résultats confirment une corrélation significative entre les valeurs estimées et les valeurs mesurée de la constante diélectriques en bande L mais pas en bande C (figure 15).

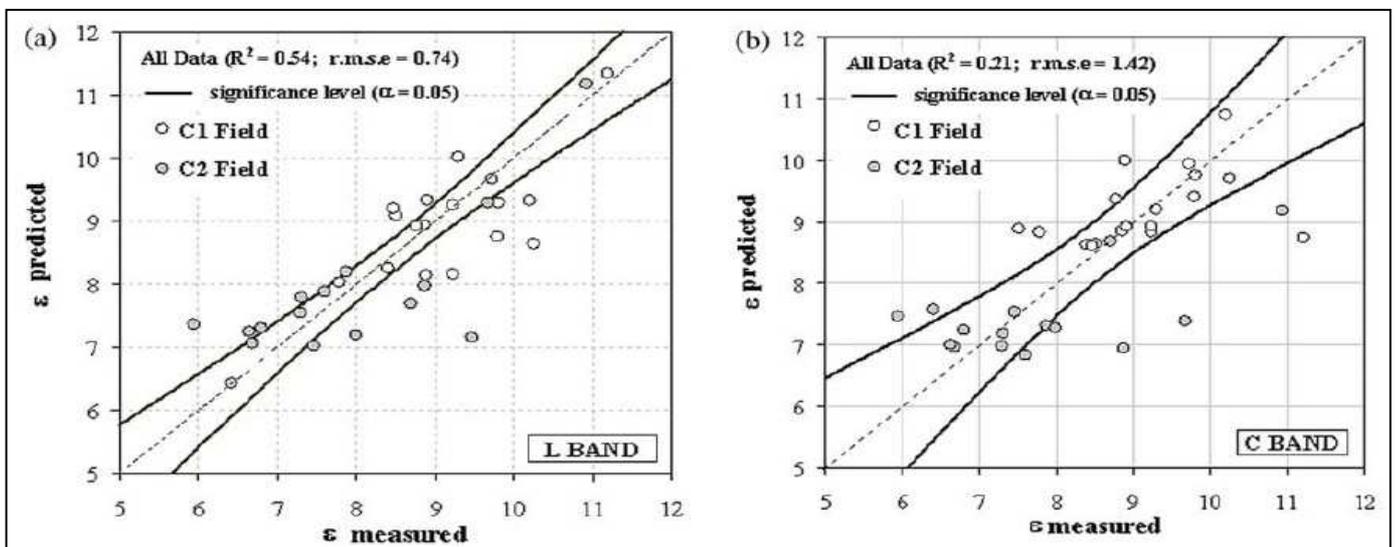


Figure 15. Comparaison entre la constante diélectrique estimée et celle mesurée en bandes L et C (D'Urso et Minacapilli, 2006).

2.2.2.3. Modèles physiques (modèle de l'équation intégrale - IEM)

Ces modèles déterminent le comportement de la rugosité de surface et intègrent tous ses termes. Ce sont des modèles compliqués dont l'utilisation pour l'inversion des valeurs de l'humidité est difficile à cause du nombre élevé d'intrants qu'ils nécessitent.

Dans l'étude de Ramnath (2003), le modèle d'inversion utilisé IEM (integral equation method) utilisant des données SAR de RADARSAT donne de bons résultats avec une faible erreur (*rmse* de $\sigma^0 = 0,0048$). Et, l'utilisation d'un ensemble de données en polarisations multiples, fréquences multiples et angles d'incidence multiples, permet de cartographier la rugosité du sol et donne ainsi une estimation plus précise de l'humidité du sol en surface.

2.2.2.3. Choix de la méthode

Les trois exemples cités précédemment prouvent l'efficacité et la précision raisonnable de l'utilisation des microondes active pour l'estimation de l'humidité du sol.

La puissance des systèmes d'information géographique et de la télédétection comme outils, offre une large gamme de possibilités et de perspectives de développement pour généraliser les modèles d'inversion pour les différents types de sols (en ajoutant des informations sur la texture, la densité apparente), sous différents climats (en ajoutant des paramètres climatiques), avec des types différents de couvert végétal (en utilisant les indices extraits des images optiques) ... etc.

Les modèles physiques sont difficiles d'utilisation. Ils nécessitent des connaissances approfondies en physique du rayonnement, et un certain nombre d'intrants (information sur la rugosité de surface et sur le couvert végétal) pour donner des estimations de l'humidité du sol en surface. C'est principalement pour ces raisons que beaucoup d'auteurs utilisent les modèles semi-empiriques ou bien l'approche de détection des changements.

Nous avons opté dans ce travail pour l'approche de détection des changements en raison de sa simplicité et de sa précision. De plus, les corrections qu'elle apporte par rapport à la rugosité de surface et aussi l'effet de la végétation sont les meilleurs possibles. Pixel par pixel, l'effet est corrigé par rapport à une scène de référence ce qui permet d'obtenir des cartes de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface à partir des images RSO par une simple soustraction.

3. Présentation de la région d'étude

3.1. Localisation

Les hautes plaines de l'Est de l'Algérie se caractérisent généralement par un relief assez plat, entaillé par des cours d'eau et des ruisseaux assez nombreux. Le relief devient plus accidenté en se déplaçant vers le Nord ce qui le rend difficile à l'agriculture. Les pratiques dominantes sont l'assolement biennal céréale-jachère et l'élevage ovin.

Le présent travail a été réalisé dans la wilaya de Sétif. Elle fait partie des hautes plaines de l'Est de l'Algérie. Elle est située entre les latitudes $35,6^{\circ}$ et $36,6^{\circ}$ Nord et entre les longitudes $4,8^{\circ}$ et $6,1^{\circ}$ Est. Elle couvre une superficie de 6550 km^2 . Elle est limitée au nord par les wilayas de Bejaia et de Jijel, à l'Est par la wilaya de Mila, au sud par les wilayas de Batna et de M'sila et à l'Ouest par la wilaya de Bordj Bou-Arredj (figure 16).

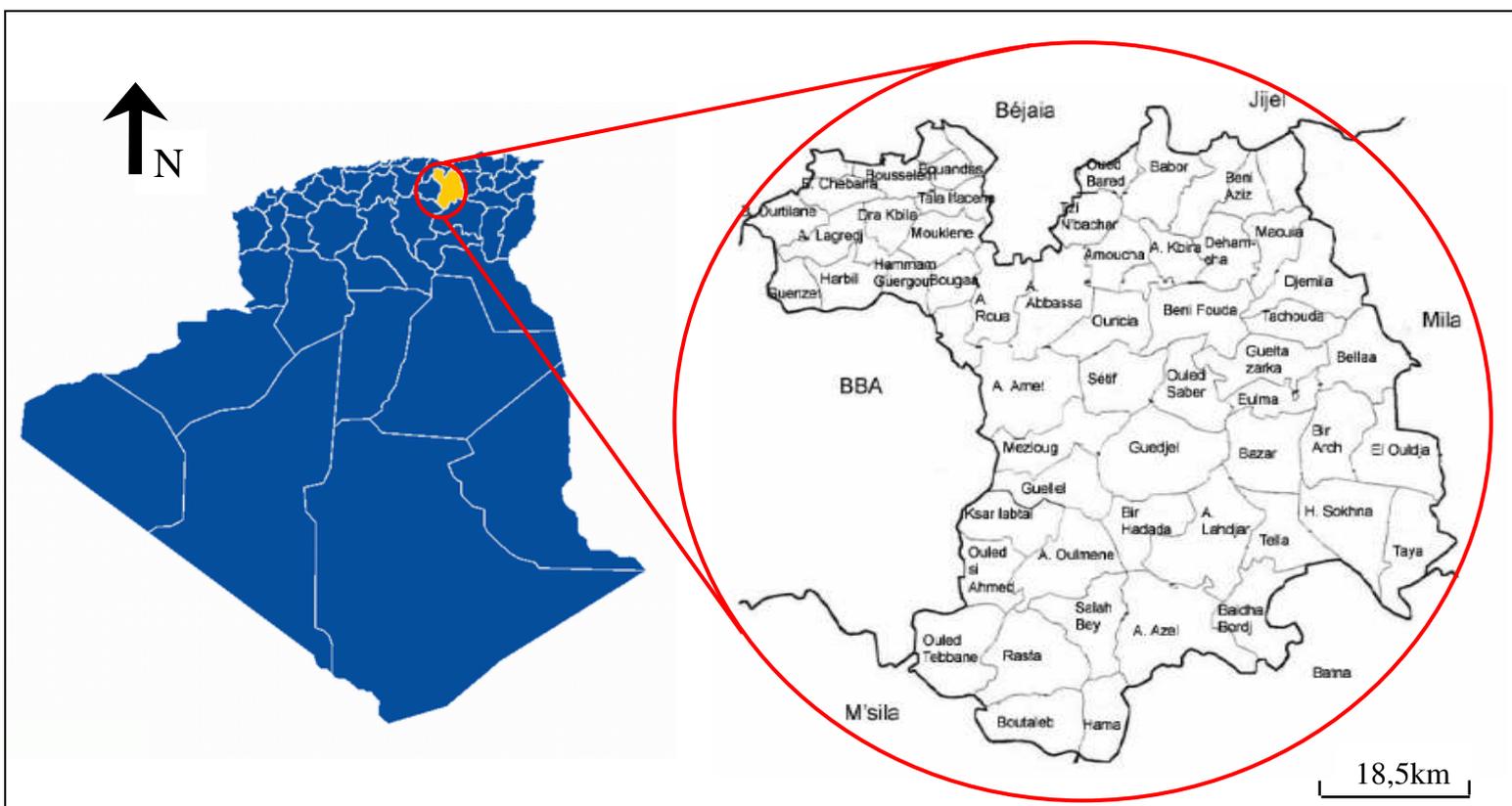


Figure 16. Localisation de la région d'étude.

3.2. Le relief

Sétif présente plusieurs discontinuités topographiques. D'une manière générale, c'est une région de hautes terres où trois zones se distinguent (figure 17).

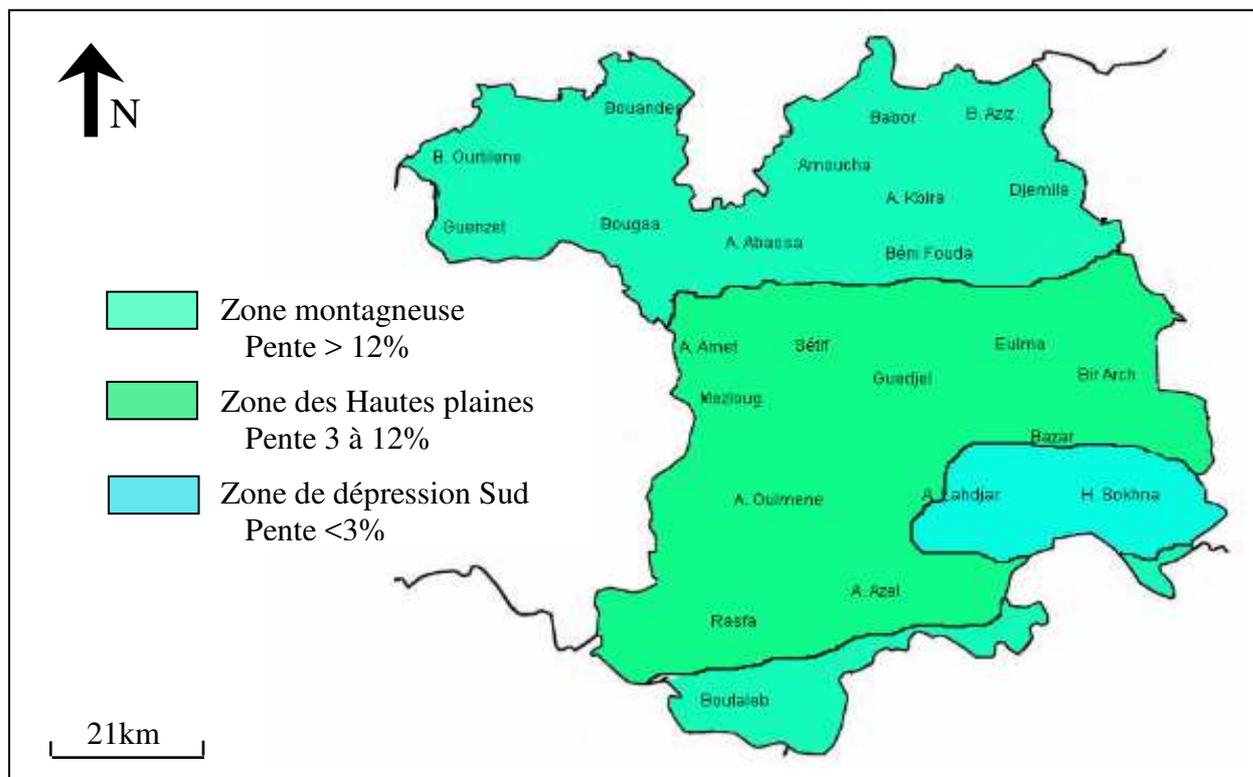


Figure 17. Relief de la wilaya de Sétif (Mouffok, 1997).

✚ **La zone montagneuse :** Cette zone est caractérisée par une topographie accidentée, elle est constituée de trois masses montagneuses :

- les monts de Babor sont situés au Nord de la wilaya et s'étendent sur une centaine de kilomètres. L'altitude maximale est de 2000 m ;
- les monts des Bibans dont l'extrémité orientale couvre le Nord-Ouest de la wilaya ;
- les monts d'El Hodna s'étalent sur le Sud et le Sud-Ouest de la wilaya. L'altitude atteint jusqu'à 1890 m au Djebel-Afgane (Boutaleb).

Cette zone occupe environ 2 870 km² soit 44% de la superficie de la wilaya

✚ **La zone des hautes plaines :** Elle occupe la partie centrale de la wilaya avec une superficie de 3217 km² soit 49% de la surface totale de la wilaya de Sétif. Elle est dominée par une topographie légèrement ondulée avec des altitudes comprises entre 800 et 1300 m.

✚ **La zone de dépression** : elle occupe la partie sud-est de la wilaya, cette zone est marquée par un relief plat ou l'altitude ne dépasse guère 900 m, et la présence des dépressions salines : Chott El Beida, Chott El Ferraine, Sebket Melloul et Sebket Bazer. Sa superficie est de 460km² soit 7% de la surface de la wilaya.

3.3. Climat

La structure des reliefs a ses conséquences sur le climat de la région. Les montagnes du Babor aux extrêmes Nord sont les plus arrosées, recevant annuellement plus de 700mm de précipitations. Cette formation montagneuse provoque le blocage des influences maritimes en réduisant ainsi le taux de précipitation, qui se situe à 400mm au Centre et à moins de 200mm à l'extrême Sud de la wilaya (figure 18). Ces précipitations sont caractérisées par l'irrégularité dans le temps et dans l'espace. Généralement, les étés sont chauds et secs et les hivers froids et rigoureux.

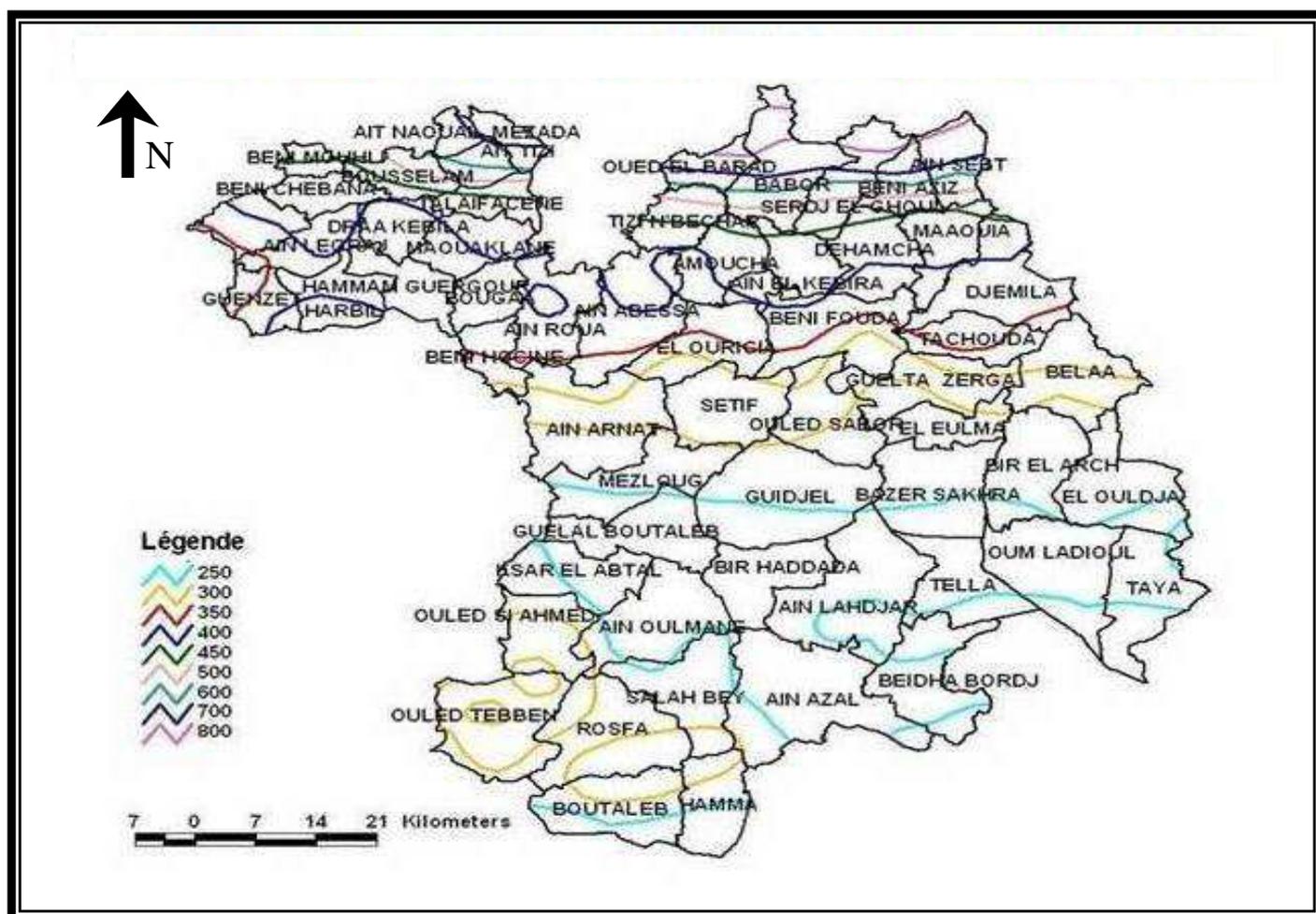


Figure 18. Isohyètes des moyennes annuelles de précipitation de la wilaya de Sétif (Direction des services agricoles de Sétif, 2006).

Les températures et les précipitations varient selon la saison (tableau 4). L'examen de l'évolution des moyennes mensuelles durant 25 années dans la zone des hautes plaines montre que janvier est le mois le plus froid (5°C) et juillet le plus chaud (26,1°C). Le mois de décembre est le plus pluvieux (51,1mm) et juillet le moins pluvieux (12,4mm).

Par ailleurs, l'ETP atteint son maximum en juillet (354,6mm) et ne dépasse pas 55mm en décembre.

Tableau 4. Pluviométrie, température et ETP de la station météorologique de Sétif (moyennes mensuelles de 1981 à 2006).

Mois	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
P (mm)	41.8	35.5	34.6	37.1	49.9	21.1	12.4	15.5	43.9	32.8	35.9	51.1	398,44
T (°C)	5	6.1	8.9	11.7	16.8	22.1	26.1	25.6	20.6	15.8	9.9	6.1	
ETP (mm)	64,33	73,58	115,4	132,9	184,7	273,2	354,6	325,1	201,4	142,3	79,76	54,88	2002,36

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussien tracé à partir des données du tableau 4 permet de distinguer une période sèche et une période humide (figure 19).

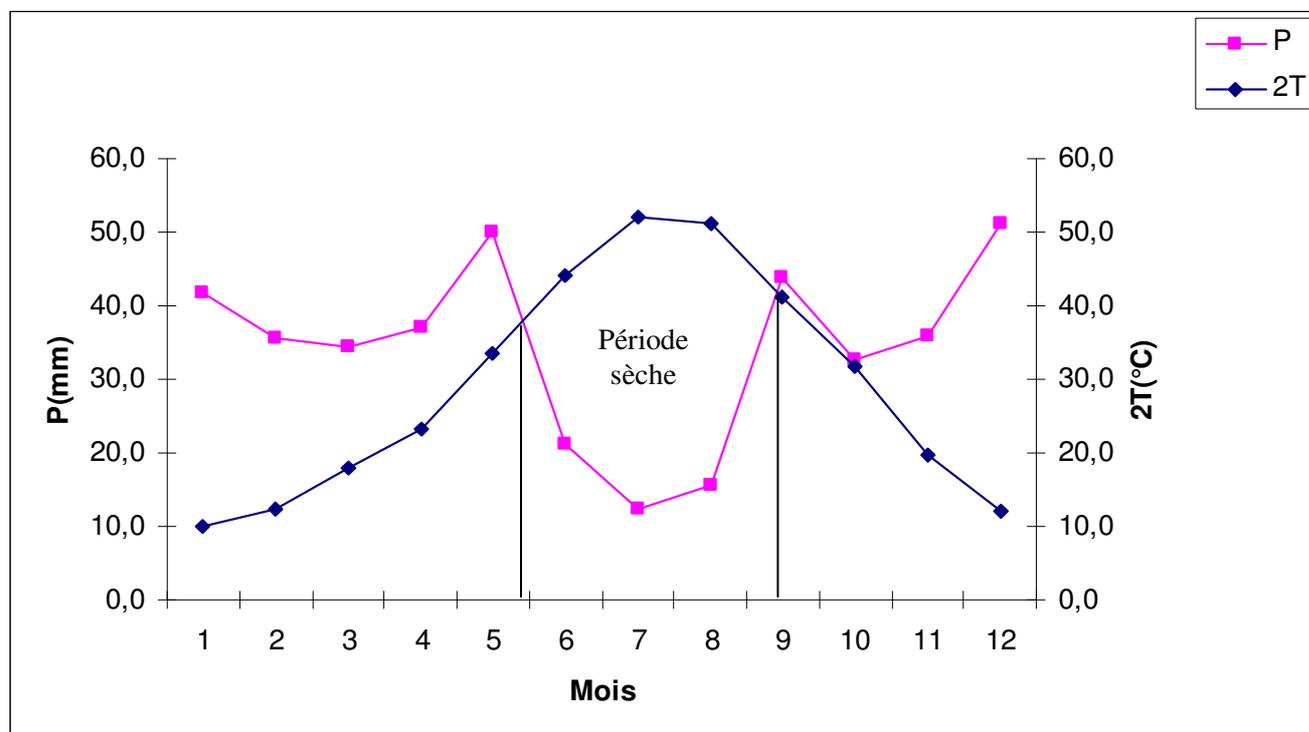


Figure 19. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussien.

- La période humide s'étale de la fin septembre jusqu'à la fin mai. Les précipitations moyennes durant cette période sont de 340mm, assez pour satisfaire les besoins des plantes.

- La période sèche est d'environ quatre mois, elle commence généralement au mois de juin et se termine à la mi-septembre. La quantité moyenne de précipitation pendant cette période est de 70mm. Cette quantité n'est pas suffisante pour répondre aux besoins des végétaux.

Les gelées se produisent dans l'ensemble de la région, mais elles sont très fréquentes dans les montagnes et les hauts plateaux. On peut avoir jusqu'à 57 jours de gelée par an (Tableau 5).

Tableau 5. Nombre de jours mensuel de gelée blanche (station météorologique de Sétif, moyennes mensuelles de 1981 à 2006).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
Gelée	15	13	8	4	1	0	0	0	0	0	4	12	57

3.4. Le sol

Les sols de la région de Sétif présentent, tout comme le climat, de grandes variations du nord vers le sud :

- Dans la partie nord de la région, les sols se sont développés sur des alluvions. Ils sont plus profonds avec des teneurs élevées (30 à 42%) en argile (Ouamer-Ali, 2007).
- Les Calcisols développés sur alluvions, sur colluvions ou encore sur marnes représentent la majeure partie des sols des hautes plaines. Ces sols sont fortement carbonatés. Les carbonates de calcium sont généralement présents dès la surface du sol. En profondeur, ils sont sous forme d'accumulations de type amas ou nodules ou encore des encroutements ou croutes calcaires.
- Dans la partie sud, les sols sont moins profonds à cause de la présence d'une accumulation calcaire endurée (croute, dalle) proche de la surface.

3.5. Hydrologie

Les eaux superficielles de la région de Sétif se résument en un apport du barrage de Ain Zada, deux autres petits barrages et 12 retenues collinaires, dont la quantité mobilisée s'élève à plus de 29 millions de mètre cube (tableau 6). Ces ressources sont alimentées par un réseau d'Oueds dont les principaux sont Oued Boussellam dans la partie Ouest, Oued Dehamcha et Oued Menaâ dans la partie Nord-Est et Oued Ftissa et Oued Ben Dhiab dans la partie Sud de la région. Ces cours d'eau sont tributaires de l'inégalité et de l'irrégularité des précipitations, les lits sont secs en été et souvent parcourus par des crues violentes et abondantes pendant la période hivernale.

Tableau 6. Origine des eaux superficielles et souterraines (Direction de l'hydraulique Sétif, 2003).

	Origine	Nombre	Quantité (millions m ³)
Eaux superficielles	Apport du barrage (BBA)	01	22,07
	Petits barrages	02	02,07
	Retenues collinaires	12	05,47
	<i>Total eaux superficielles</i>		29,61
Eaux souterraines	Puits	16250	12,87
	Forages	165	65,87
	Sources	196	14,90
	<i>Total eaux souterraines</i>		93,64
Total	Total		123,25

3.6. La végétation

Sétif est une région agricole par excellence. La superficie agricole totale et la superficie agricole utile représentent respectivement 70% et 55% de la superficie totale de la wilaya (Tableau 7).

Les cultures herbacées et les jachères occupent 93% de la SAU totale. Par contre les prairies et les plantations d'arbre (hors forêts) sont limitées (7,25%). L'irrigation touche 5% de la SAU et concerne les cultures maraîchères, les plantations arboricoles et les fourrages.

La céréaliculture pluviale reste la principale activité agricole, d'après Lahmar (1992) il semblerait que 18 variétés de céréales (dont 8 de blé dur, 3 de blé tendre, 4 d'orge et 3 d'avoine) soient bien adaptées à la région.

Les cultures fourragères sont en deuxième position (environ 10% de la superficie des cultures herbacées). Cependant, ses superficies subissent des fluctuations interannuelles importantes. Durant ces dernières années, la mobilisation des eaux souterraines a produit un développement considérable des cultures fourragères accompagné d'un fort développement de l'élevage bovin laitier dans cette région.

Les cultures maraîchères occupent environ 5% des superficies réservées aux cultures herbacées (Direction des services agricoles de Sétif, 2004) et sont dominées par la pomme de terre.

Tableau 7. Occupation des sols dans la région de Sétif (Direction des services agricole, 2004).

		Superficie (Ha)	Pourcentages	
Superficies Agricoles Utiles	Terres labourables	Cultures Herbacées	165 881	45,96% SAU
		Jachères	169 011	46,83% SAU
	Cultures permanentes	Prairies naturelles	1 967	0,54% SAU
		Vignobles	25	0,006% SAU
		Plantation d'arbre	24 006	6,65% SAU
Total SAU		360 890	55,10% ST	
Dont SAU irriguée		18 499	5,12% SAU	
Pacages et parcours		57 880	12,58% SAT	
Terres improductives des exploitations		41 300	8,97% SAT	
Total des terres utilisées par l'agriculture (SAT)		460 070	70,24% ST	
Superficies forestières		101 706	15,52% ST	
Terres improductives non affectées à l'agriculture		93 168	14,22% ST	
Superficie totale de la wilaya (ST)		654 944		

Chapitre II. Matériel et méthodes

1. Description des données de terrain et des données de télédétection

1.1. Choix des sites d'étude

Les caractéristiques des sites d'étude, notamment le microrelief, le type de sol et le couvert végétal affectent considérablement la mesure de l'humidité de surface par microondes. D'abord, il a été choisi de travailler sur des sites plats afin de minimiser l'effet du relief et des distorsions géométriques sur les images radar. Par la suite, nous avons sélectionné différents types de couvert végétal afin de déterminer son effet sur le signal radar. Et enfin, deux parcelles irriguées ont été suivies pour tester la précision des estimations en présence d'une large gamme des valeurs d'humidité.

L'analyse de documents secondaires et des études précédentes des sols de la région de Sétif, notamment celles de Ouamer-Ali (2007), Bendahmane (2008) et Saoud (2009), associée à des observations de terrain nous a permis de choisir trois sites représentant les principaux types de sol présents dans la wilaya. Ces sites sont localisés dans la zone centre et la zone sud de la wilaya. Il s'agit d'un sol calcimagnésique, un sol à caractère vertique et d'un sol léger, peu évolué.

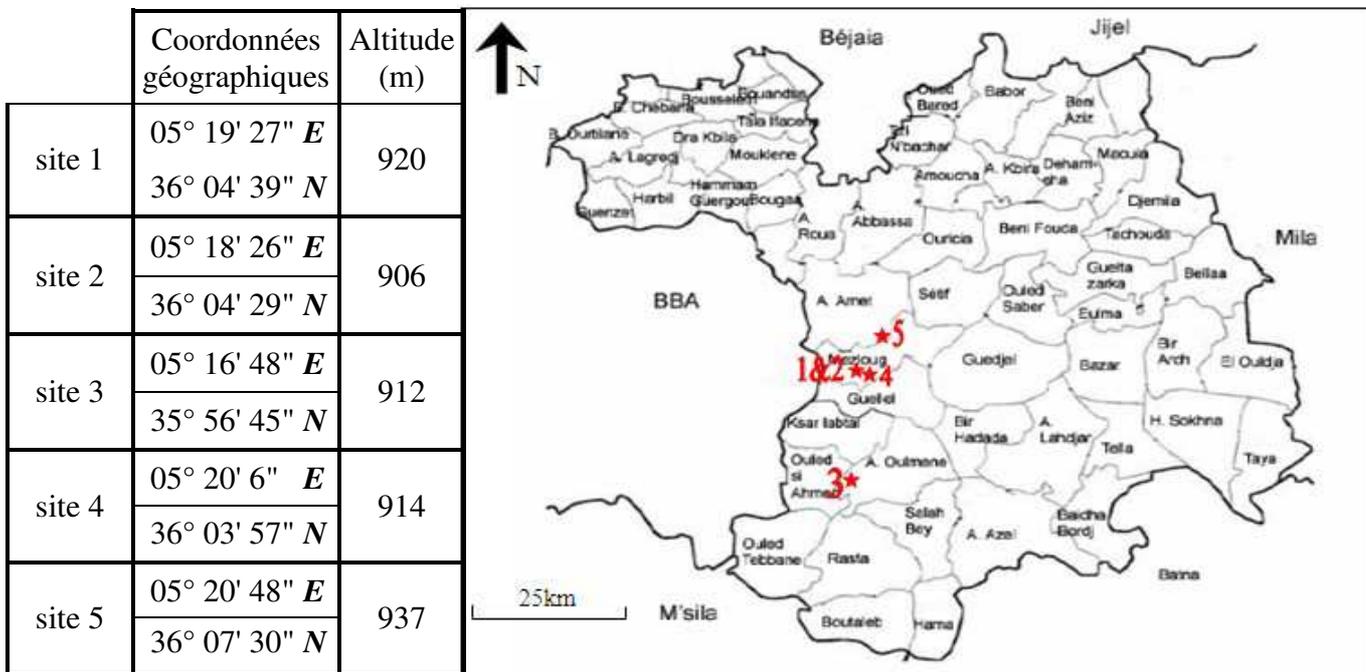


Figure 20. Localisation des sites d'étude.

1.2. Description des sites d'étude

- Le site 1 est situé dans la zone centre de la wilaya, dans la commune de Mezloug. Le sol non travaillé et non cultivé pendant la période d'étude fait partie de la classe texturale *loam* (USDA), il est très riche en calcaire et contient une charge caillouteuse importante. La taille des éléments grossiers de surface et de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres (figure 21).



Figure 21. Photos du site 1 Mezloug (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).

- Le site 2 est situé également dans la commune de Mezloug, non loin du premier site (moins de 1km) mais le sol appartient à la classe texturale *silty clay* (USDA). C'est un sol lourd, non calcaire qui ne contient pas d'éléments grossiers. Cette différence de texture et l'absence du calcaire et des éléments grossiers sont dues au fait que le sol du site 2 s'est formé sur une terrasse alluviale, et la présence d'un cours d'eau à quelques mètres justifie cette hypothèse. La parcelle était cultivée en blé dur non irrigué pendant l'année 2011. La figure 22 montre une photo du site 2 et de l'aspect de la surface du sol.



Figure 22. Photos du site 2 Mezloug (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).

- Le site 3 est situé dans la partie sud de la wilaya, dans la commune de Ain Oulmane. Le sol appartient à la classe *clay loam* (USDA), il est riche en calcaire et présente une charge caillouteuse modérée avec des éléments de taille millimétrique à centimétrique. La parcelle était cultivée en blé dur sans irrigation pendant l'année 2011 (figure 23).



Figure 23. Photos du site 3Ain Oulmane (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).

- Le site 4 situé dans la commune de Mezloug est cultivé en carottes, en irrigué. Le sol y est de texture argileuse (*clay* selon la classification USDA), il présente une effervescence modérée au test d'HCl et une charge caillouteuse assez importante en pourcentage avec des éléments grossiers de taille comprise entre 0,3 et 5cm (figure 24).



Figure 24. Photos du site 4 à Mezloug (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).

- Le site 5 est situé dans la commune de Ain Arnet, il ressemble au site 2 par sa texture (*silty clay*, USDA), et par l'absence du calcaire et des éléments grossiers. La parcelle est également cultivée en blé dur (figure 25) mais en irrigué.



Figure 25. Photos du site 5 à Ain Arnet (gauche) et de l'aspect de surface du sol (droite).

1.3. Description des données de télédétection

1.3.1. Le satellite Envisat

Le satellite Envisat (figure 26) a été lancé par l'agence spatiale européenne (ESA) en Mars 2002. C'est un satellite de deuxième génération offrant une large gamme de produits, car il embarque un total de dix instruments qui opèrent dans différents domaines du spectre électromagnétique et à différents angles d'incidence, il s'agit de :

- Mipas (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding): c'est un sondeur atmosphérique passif fondé sur la technique d'interférométrie qui scrute les traces de gaz liés aux activités industrielles,
- Meris (Medium Resolution Imaging Spectrometer): un spectromètre imageur optique à moyenne résolution spatiale (260 m) qui travaille en lumière visible et proche infrarouge sur 45 canaux (entre 390 et 1040 nm). Il sert notamment à suivre la biosphère marine et terrestre. Masse 200 kg,
- Gomos (Global Ozone Monitoring by the Occultation of Stars): il fait des mesures de l'ozone atmosphérique à l'échelle globale fondée sur une technique d'occultation stellaire pour surveiller la couche d'ozone,
- RA-2: est un altimètre radar pour l'observation des courants océaniques à moyenne échelle,
- LRR: c'est un rétro-rélecteur laser,
- AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer): imageur optique visible et infrarouge avec visée multi-angulaires,
- Sciamachy (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) est un spectromètre imageur à balayage pour la cartographie de la composition chimique de l'atmosphère notamment pour les gaz à l'état de traces et les concentrations d'aérosols,
- MWR: un radiomètre hyperfréquence (microonde),
- Doris: pour la détermination d'orbite et de positionnement précis,
- ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar): c'est un radar à synthèse d'ouverture de conception avancée,

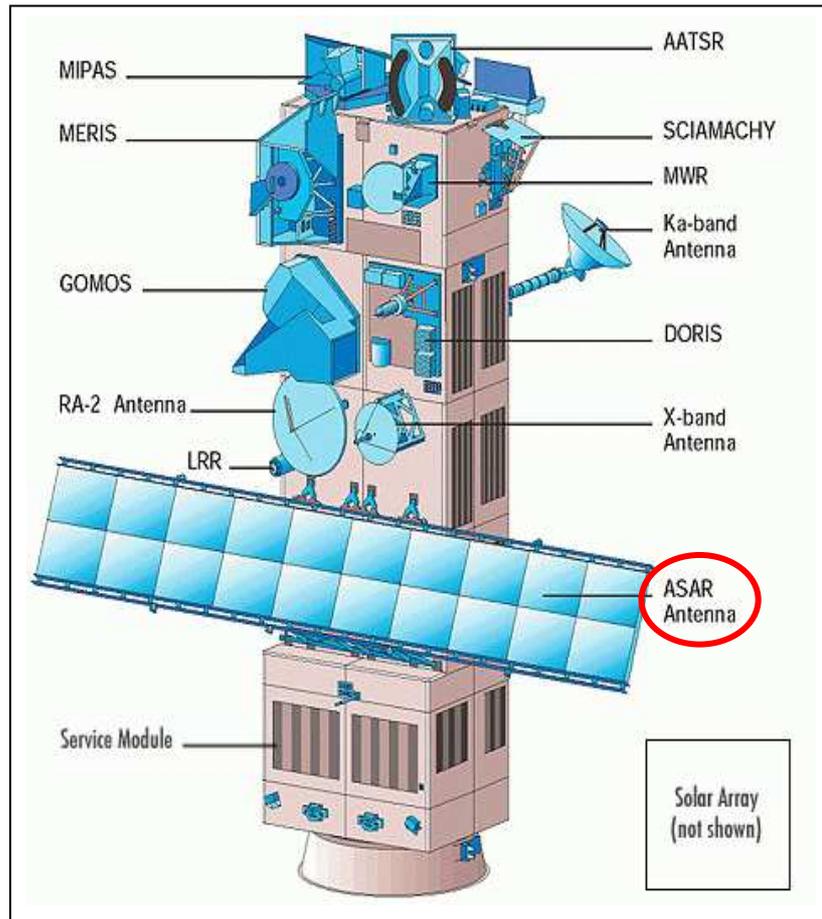


Figure 26. Le satellite Européen Envisat et les Instruments à bord.

1.3.2. Le capteur ASAR

L'instrument ASAR embarqué à bord du satellite Envisat a été construit sur la base de l'expérience acquise à partir du capteur microonde actif (AMI) des satellites ERS 1 et 2 pour continuer l'observation de la terre. C'est un capteur actif en bande C (5,3 GHz) qui permet d'utiliser cinq modes différents d'acquisition. Il est capable de balayer une large plage d'angles d'incidence (de 15° à 45°) et de modifier sa polarisation (HH, VV, HV et VH). Les horaires de prise de vue sont aux alentours de 09:50 UTC en nœud descendant, et 22:00 UTC en nœud ascendant avec un cycle répétitif de 30 jours pour la même emprise d'image. Le tableau suivant présente les produits de l'instrument ASAR et leurs propriétés.

Tableau 8. Les différents modes et produits du satellite Envisat (ASAR Product Handbook, 2007)

Modes	Détails	Niveau de prétraitement	détails
Image (IM)	la taille de la scène est : 56-100*100km les fauchées IS1 ... IS7 correspondant à des angles d'incidence entre 15° à 45°, la résolution nominale est de 25 à 30m avec une taille des pixels de 12,5*12,5m ; la polarisation est soit VV ou HH	Annotated Raw Data (RAW)	données brutes
		Single-look Complex (SLC)	image haute résolution avec un faible nombre de corrections pour avoir plus de liberté de dériver des produits de niveau supérieur.
		Precision image (PRI)	image générée en utilisant l'algorithme "Range/Doppler" avec les meilleures corrections disponible de l'instrument.
		Geocoded Image (GEC)	même niveau de prétraitement du produit PRI plus opération de géocodage.
		Medium-resolution Image (MR)	image de résolution moyenne de 150m avec une taille de 400*400km
Alternating Polarization (AP)	Polarisation HH/VV, HH/HV ou VV/VH	RAW, SLC, PRI, GEC et MR	<i>même caractéristique de chaque niveau de prétraitement que pour le mode image.</i>
Wide Swath (WS)	Polarisation HH ou VV	RAW, SLC, MR	<i>même caractéristique de chaque niveau de prétraitement que pour le mode image</i>
Global Monitoring (GM)	Polarisation HH ou VV	RAW, SLC, MR	<i>même caractéristique de chaque niveau de prétraitement que pour le mode image</i>
Wave (WV)	Imagette de dimension de 5-10*5km en polarization HH ou VV convertie en mode "Wave" pour le suivi des océans		

1.3.3. Caractéristiques des images acquises

Quatre images couvrant la région d'étude (figure 27) ont été acquises de mars à juin 2011 par le satellite Envisat. Parmi les produits ASAR disponibles, nous avons opté pour la configuration suivante :

- Le mode d'acquisition : **Image** ;
- Swath : **IS3** avec un angle d'incidence compris entre **22° et 28°** ;
- La polarisation : **VV** (verticale en émission et en réception) ;
- La résolution spatiale : **25 m** (avec une taille du pixel de 12,5*12,5m) ;
- Niveau de prétraitement : **1P, Image géocodée** (GEC). Sur les produits géocodés, une correction géométrique est faite pour se conformer à une projection cartographique. On utilise souvent des points de contrôle au sol (PCS) et un modèle numérique de terrain (MNT) pour augmenter la précision du géocodage. Les produits sont traités de façon à ce que le nord soit au haut de l'image et corrigé en fonction d'une projection cartographique.
- Orbite : **descendant**, le temps du passage du satellite est 09:49:10 UTC (Universal Time Clock correspondant au temps GMT) ;

- Les mêmes caractéristiques ont été choisies pour l'ensemble des images (mode, polarisation, fauchée, orientation de l'image, angle d'incidence et orbite descendant).

Les dates d'acquisition sont les suivantes :

- 17 mars 2011 ; - 16 avril 2011 ; - 16 mai 2011 ; et - 15 juin 2011.

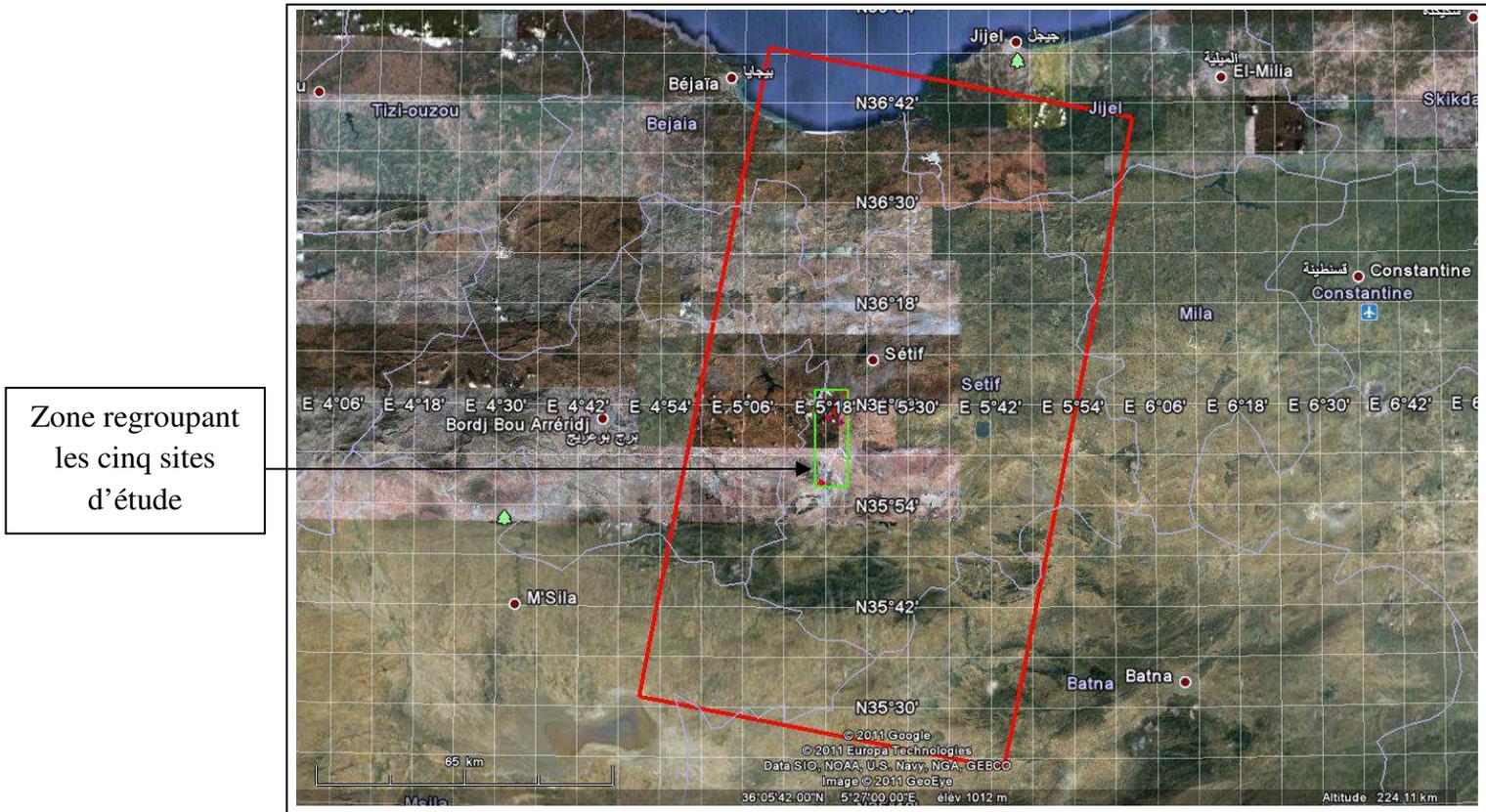


Figure 27. Image de l'emprise du 17 mars 2011.

2. Méthodologie

2.1. Collecte des données de terrain

Les données de terrain utilisées dans ce travail de recherche proviennent de cinq sites. Nous avons fait un premier prélèvement pour la mesure de l'humidité de terrain et un deuxième prélèvement pour déterminer les principales propriétés du sol en relation avec la rétention en eau notamment l'analyse granulométrique, la densité apparente et la mesure des humidités caractéristiques.

2.1.1. Mesure de l'humidité de terrain

Les prélèvements pour l'estimation de l'humidité du sol en surface ont été effectués les jours du passage du satellite autour de l'heure de l'acquisition de l'image (10:50 A.M.) pour ne pas avoir des variations importantes entre l'état d'humidité, le temps d'acquisition et le temps de prélèvement.

Dans chaque site, une zone représentative a fait l'objet d'un échantillonnage systématique avec un pas d'environ 25m (figure 28). La résolution d'échantillonnage est choisie en fonction de la résolution spatiale du satellite Envisat. Les échantillons provenant des cinq premiers centimètres de surface ont été mis dans des boîtes métalliques fermées hermétiquement pour conserver leur humidité. Enfin, la méthode gravimétrique classique a été utilisée pour mesurer la teneur en eau de ces échantillons.

L'échantillonnage dans les parcelles irriguées (site 4 et 5) n'a été fait que pour les mois de Mai et Juin correspondant à la période de l'irrigation. Le but de ce choix était d'avoir une large gamme des valeurs de l'humidité de surface pour la même scène. L'approche de détection des changements n'a pas pu être utilisée car nous n'avons pas de scène de référence de l'état sec du sol.

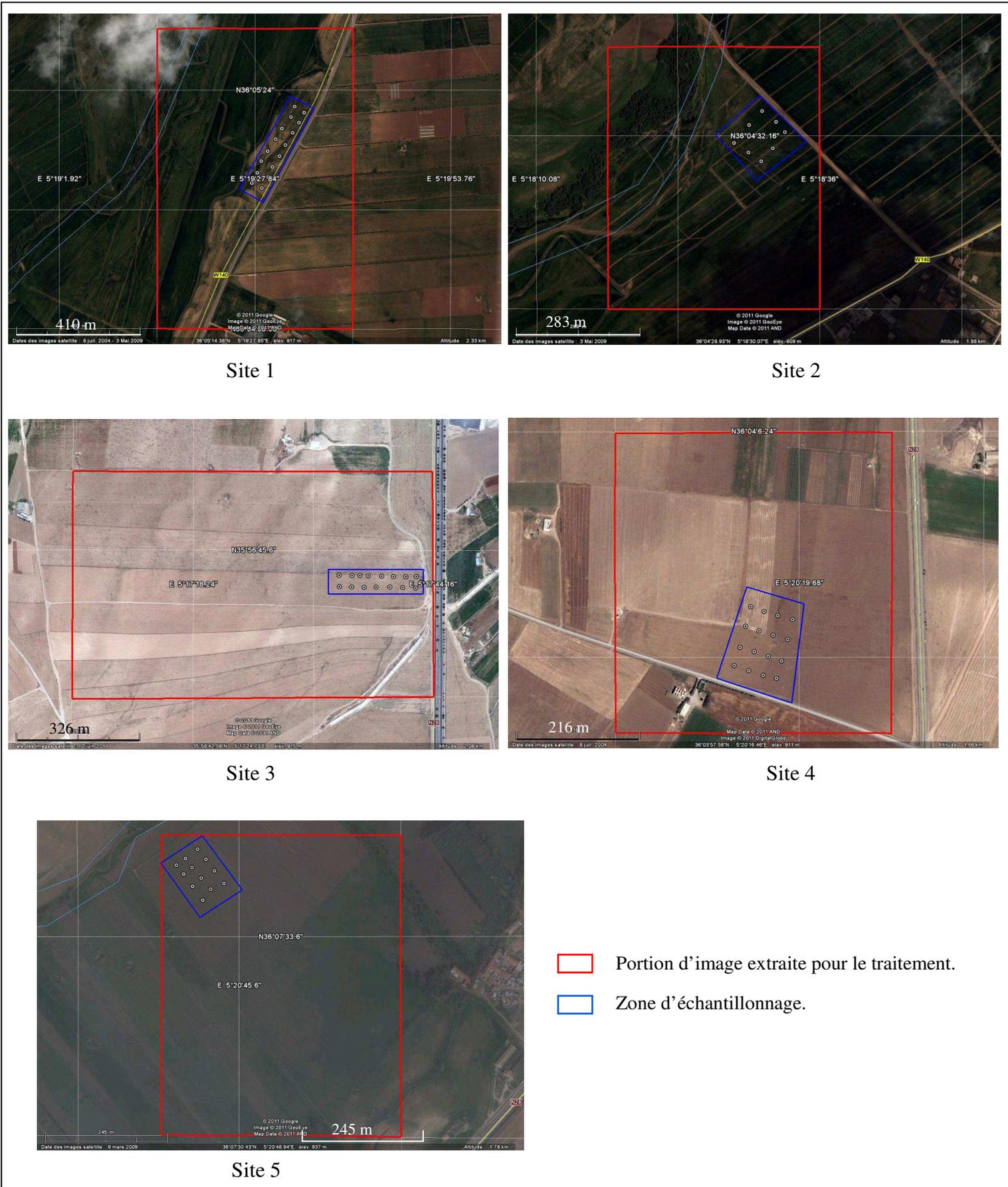


Figure 28. Localisation des cinq parcelles étudiées.

2.1.2. Prélèvements pour la caractérisation des propriétés physiques du sol

Nous avons fait des prélèvements supplémentaires avec pour objectif de compléter ou corriger les résultats de la mesure de l'humidité de terrain, ou d'aider à interpréter les résultats obtenus.

- La mesure de la densité apparente nous permet de transformer les valeurs d'humidité pondérale en humidité volumique, paramètre indispensable pour les tests statistiques. Le coefficient de rétrodiffusion radar dépend de la constante diélectrique du sol. Cette dernière est calculée en pondérant les constantes diélectriques des différents constituants du sol (i.e. eau, air et solide) par leur contenu volumétrique partiel (modèle semi-empirique de référence proposé par Dobson et al. (1985). Etant donné la petite valeur de la constante diélectrique de l'air ($\epsilon_b \sim 1$) et des particules solides du sol ($\epsilon_s \sim 4$) comparée à celle de l'eau ($\epsilon_w \sim 80$), la constante diélectrique du sol humide dépend très fortement du volume d'eau dans le sol. C'est cette dépendance qui est utilisée pour estimer l'humidité du sol et l'exprimer en volume (Escorihuela, 2006). Nous avons utilisé la méthode du cylindre pour calculer la densité apparente moyenne par site à partir de 6 à 8 mesures par site.
- L'analyse granulométrique aide à l'interprétation des résultats de mesure de l'humidité par rapport à la texture du sol et donc sa capacité de rétention. La méthode internationale à la pipette de Robinson a été utilisée pour cette analyse.
- La mesure des humidités caractéristiques présente un intérêt agronomique via la détermination de deux valeurs : le point de ressuyage ou capacité de rétention (CR) et le point de flétrissement permanent (PFP). Quand on établit la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité volumique du sol, il est intéressant d'expliquer la signification statistique par rapport à la capacité de rétention du sol.

2.2. Traitement des données de télédétection

Lors de son passage, le satellite ne stocke pas l'information sous forme de coefficient de rétrodiffusion radar. Chaque pixel contient un chiffre appelé *compte numérique* (CN). Ainsi, les images satellites acquises doivent subir un prétraitement de plusieurs étapes dans le but d'extraire le coefficient de rétrodiffusion radar à partir des données brutes enregistrées.

Le traitement proprement dit est fait sur des images calibrées. Dans cette étape, nous pouvons afficher, analyser, modifier et combiner les images calibrées afin d'obtenir les résultats souhaités.

2.2.1. Le prétraitement des images Envisat

Dans le but d'extraire le coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0 en dB) à partir des images brutes, le logiciel "*BEST v4.2.1-a*" a été utilisé.

- BEST (Basic ERS/Envisat SAR Toolbox) est un outil logiciel, mis par l'agence spatiale Européenne (ESA) à la disposition des utilisateurs des images RSO des satellites ERS et Envisat. Cet outil n'est pas une réplique des produits commerciaux existant mais un complément de fonctions dédiées à la manipulation des produits RSO du capteur ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) et du capteur AMI (Active Microwave Instrument) à bord des satellites Envisat et ERS 1&2 respectivement.

L'interface du logiciel ne permet pas de visualiser des images mais de les convertir en formats reconnus par les logiciels commercialisés ENVI, ERDAS ArcGIS ... etc. (manuel d'utilisateur BEST v4.2.2, 2009).

Le produit acquis, dit « brut », correspond à une image d'amplitude. L'extraction du coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0) passe par plusieurs étapes, définies comme étant une **chaîne typique de traitement** du logiciel BEST (figure 29). Les valeurs et les paramètres choisis pour chaque opération sont spécifiques au mode et à la configuration des images acquises. Les opérations réalisées sur les images acquises se résument comme suit :

- **Extraction et analyse du fichier en-tête :** Cette fonction décode toutes les informations d'en-tête du produit. Ces informations sont extraites et stockées sous forme d'un fichier texte pour visualisation, et dans un fichier en format interne du logiciel, indispensable pour les étapes suivantes. Ce fichier comprend les métadonnées, ou données descriptives des images, et les informations sur les caractéristiques du capteur.
- **Génération d'un aperçu de l'image :** permet de créer une version en résolution réduite de l'image en format standard TIFF pour visualisation (annexes).
- **Extraction de l'image en pleine résolution :** c'est une étape indispensable pour la suite des opérations. La commande utilise le fichier en-tête pour extraire et enregistrer en format interne du logiciel l'image satellite sans changement de résolution ou des valeurs des pixels.

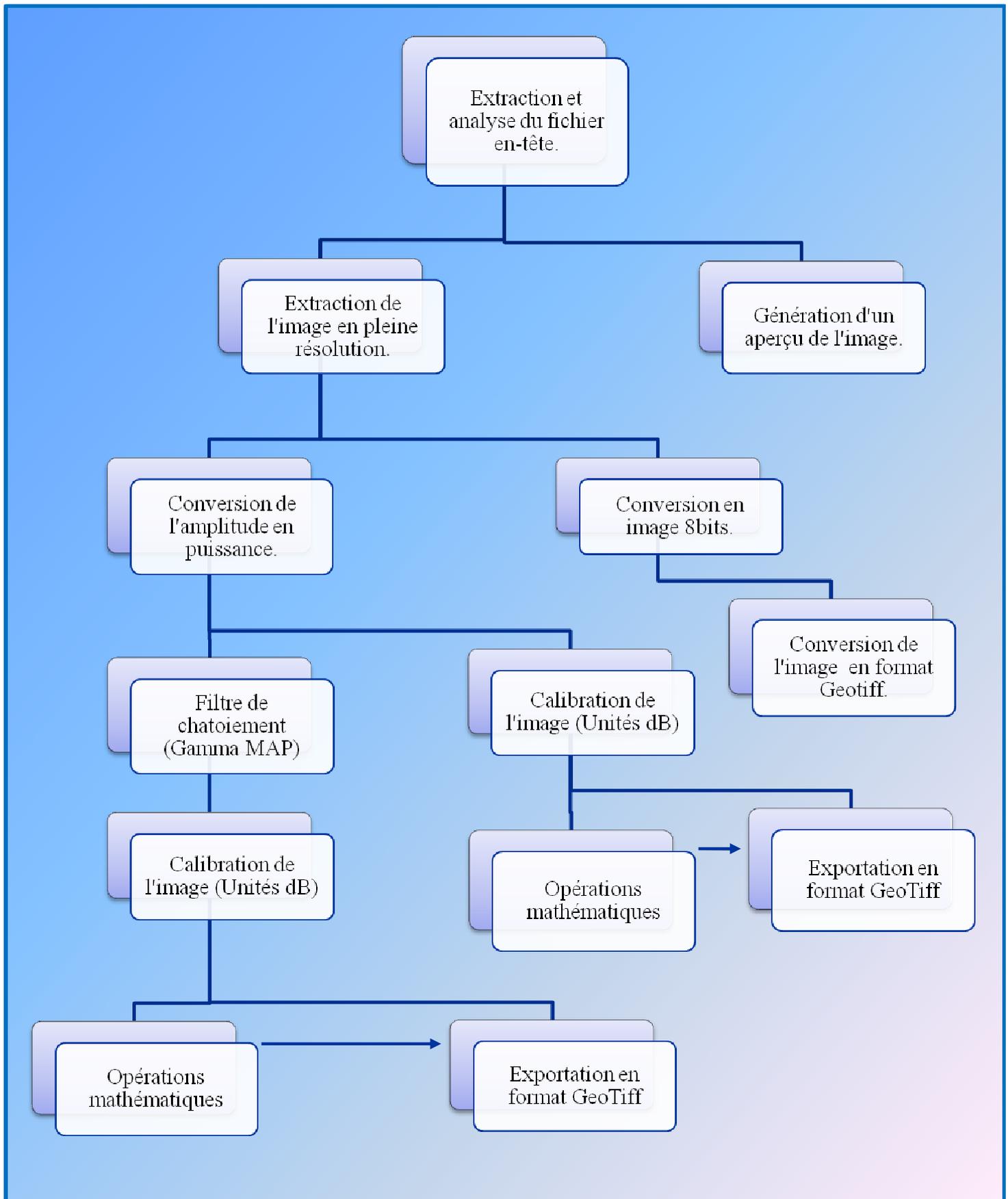


Figure 29. Chaîne typique de traitement du logiciel BEST.

- **Conversion en image 8 bits** : cet outil est souvent utilisé pour redimensionner les valeurs des pixels d'une image dans une gamme adaptée pour la visualisation (0 à 255). Cette étape est suivie par une conversion en format Tiff, reconnu par les logiciels de visualisation et de traitements des images.
- **Conversion de l'amplitude en puissance** : l'image en pleine résolution est une image d'amplitude. Cet outil calcul le carré des valeurs d'entrée, générant ainsi une image avec des valeurs en virgule flottante (ou fixe) représentant la puissance d'une image d'amplitude.
- **Filtre du chatoiement (ou speckle)** : Le filtre du logiciel BEST permet l'utilisation d'une gamme de masques différents, appliqués dans une fenêtre mobile d'une taille au choix à travers l'image d'entrée. Pour chaque position de la fenêtre, les masques sont utilisés dans l'ordre, pour déterminer la structure du trait ou l'élément dominant de l'image. Selon cette structure, l'algorithme pourrait garder la valeur du pixel central de la fenêtre, la remplacer par la moyenne des valeurs de la fenêtre ou bien utiliser le filtre Gamma MAP pour évaluer une nouvelle valeur.

Nous avons utilisé quatre tailles différentes de la fenêtre glissante (5*5, 7*7, 9*9 et 11*11 pixels) afin de choisir celle qui donne la meilleure corrélation du coefficient de rétrodiffusion avec l'humidité du sol.

- **Calibration de l'image (Rosich et Meadowsn, 2004)** : cet outil permet de convertir une image puissance Envisat-ASAR en une image de rétrodiffusion. Les effets radiométriques suivant sont corrigés :
 - L'angle d'incidence ;
 - La constante de calibration absolue ;
 - Le diagramme de l'antenne ;
 - La perte de large diffusion.

La relation entre les valeurs des pixels de l'image (CN), la luminosité radar (β^0) et le coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0) peut être écrite comme suit :

$$\text{CN}^2 = \text{constant} * \beta^0 = \frac{\sigma^0}{\sin(\alpha)} = \text{constant}(\alpha) * \sigma^0 \dots\dots\dots (1)$$

Ainsi, pour dériver le coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0) on extrait à partir de la relation (1) la formule suivante :

$$\sigma^0_{i,j} = \frac{CN^2_{i,j}}{K} (\alpha_{i,j}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

pour $i = 1 \dots L$ et $j = 1 \dots M$

- Avec K = Constante de calibration absolue (fournie dans le fichier en-tête du produit),
 $CN^2_{i,j}$ = valeur d'intensité (ou puissance) du pixel de la ligne « i » et la colonne « j »,
 $\sigma^0_{i,j}$ = Sigma zéro de la ligne « i » et la colonne « j »,
 $\alpha_{i,j}$ = angle d'incidence local de la ligne « i » et la colonne « j »,
 L, M = nombres des lignes et de colonnes de l'image respectivement.

Enfin, le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) calculé par la formule (2) est converti en décibels (dB) selon la formule suivante :

$$\sigma^0 \text{ [dB]} = 10 * \log_{10} (\sigma^0)$$

- **Opérations mathématiques :** c'est un outil qui permet l'utilisation des opérateurs mathématiques (+ ; - ; * et /) sur l'image d'entrée. Nous avons utilisé cet outil pour appliquer l'approche « détection des changements » sur deux images représentant l'état humide et l'état sec ; et pour la transformation d'une image d'entrée en une carte de distribution de l'humidité selon l'équation dérivée de la relation entre σ^0 et θ .
- **Exportation en format GéoTIFF :** c'est l'étape finale de la phase de prétraitement des images Envisat permettant la conversion de l'image calibrée en format reconnu par d'autres logiciels en vue de leur traitement et interprétation.
- **Statistiques globales :** cette fonctionnalité effectue des statistiques sur toute l'image ou sur une zone d'intérêt choisie. Elle permet de définir les valeurs des pixels minimum et maximum ; de calculer la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation ; et de classer par intervalle les valeurs des pixels de l'image d'entrée. Cette fonction nous a été très utile pour effectuer une classification afin de définir des classes d'humidité volumique de surface.

2.2.2. Le traitement des images Envisat

Les images calibrées ont été traitées avec « *ENVI 4.5* ». C'est un logiciel puissant de traitement et d'analyse des images satellites qui regroupe une collection d'outils les plus utilisés dans ce domaine (filtrage spatio-temporelle, classification, transformation d'image, cartographie, statistique ... etc.). Nous avons utilisé ce logiciel pour :

- 1- afficher les images et les valeurs du coefficient de rétrodiffusion correspondant aux points de prélèvements de mesure de l'humidité afin de les comparer (étude statistique) ;
- 2- extraire les portions d'image (ou zones d'intérêt) correspondant aux cinq sites d'étude ;
- 3- extraction des histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 pour les cinq sites d'étude ;
- 4- calculer les statistiques et faire une classification selon les valeurs radiométrique des pixels de l'image pour les cinq portions correspondant aux sites d'étude;
- 5- transformation des portions d'image en cartes de la distribution spatiale de l'humidité de surface ;

2.2.3. Réalisation des cartes de distribution de l'humidité de surface du sol

L'étude statistique des régressions linéaires nous a permis dans un premier temps d'identifier les corrélations significatives entre le coefficient de rétrodiffusion calibré (σ^0 en dB) et l'humidité volumique du sol en surface (θ). Par la suite, nous avons extrait les modèles d'inversion. Ces derniers, appliqués aux images radar, permettent de les transformer en cartes de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans chaque site.

Chapitre III. Résultats et discussion

1. Description et analyse des données

1.1. Suivi des paramètres climatiques

Nous avons acquis les données climatiques de la région auprès de la station météorologique de "Ain Sfia", wilaya de Sétif. Le suivi des paramètres précipitation, évaporation et humidité relative durant la période d'étude (mars jusqu'à juin) nous a permis de comprendre l'état d'humidité du sol durant les quatre campagnes d'échantillonnage.

- Synthèse climatique

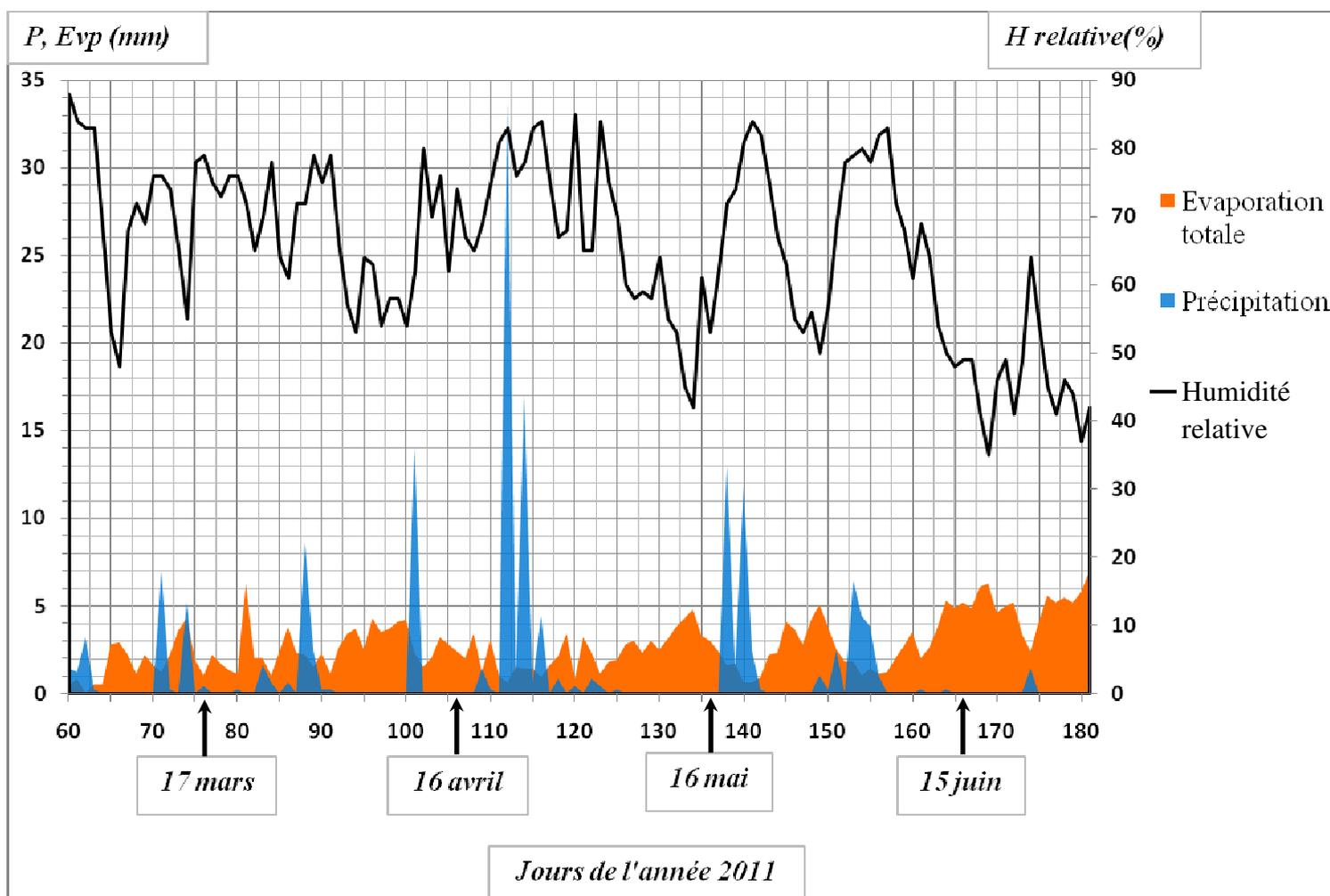


Figure 30. Représentation graphique des précipitations, de l'évaporation et de l'humidité relative dans la région de Sétif pendant la période de suivi (Station climatique Ain Sfia : 36°10'39,54'' Nord et 5°23'48'' Est).

Sur la figure 30, les quatre flèches sur l'axe horizontal représentent respectivement les quatre dates d'acquisition des images et de prélèvement des échantillons sur le terrain, soit le 17 mars, le 16 avril, le 16 mai et le 15 juin de l'année 2011.

- Nous remarquons deux pics de précipitations d'environ **7 mm** et **5 mm**, quatre et deux jours avant le 17 mars 2011. L'évaporation était comprise entre **1** et **4 mm** et l'humidité relative variait entre **55%** et **80%** quelques jours avant le premier échantillonnage. Le bilan hydrique était donc positif et les sols des sites étudiés ont été assez humides lors du prélèvement.
- Après une période de dix jours sans pluies, environ **14 mm** de précipitations ont été enregistrés cinq jours avant le deuxième échantillonnage, l'humidité relative variait entre **55%** et **80 %** alors que l'évaporation n'a pas dépassé **3 mm** depuis le 11 avril. Les sols étaient assez secs pour absorber rapidement les pluies tombées mais ont quand même gardé de l'humidité dans les cinq premiers centimètres car une croûte de battance s'est formé (figure 31) et à participé à la préservation de l'humidité du sol en surface.

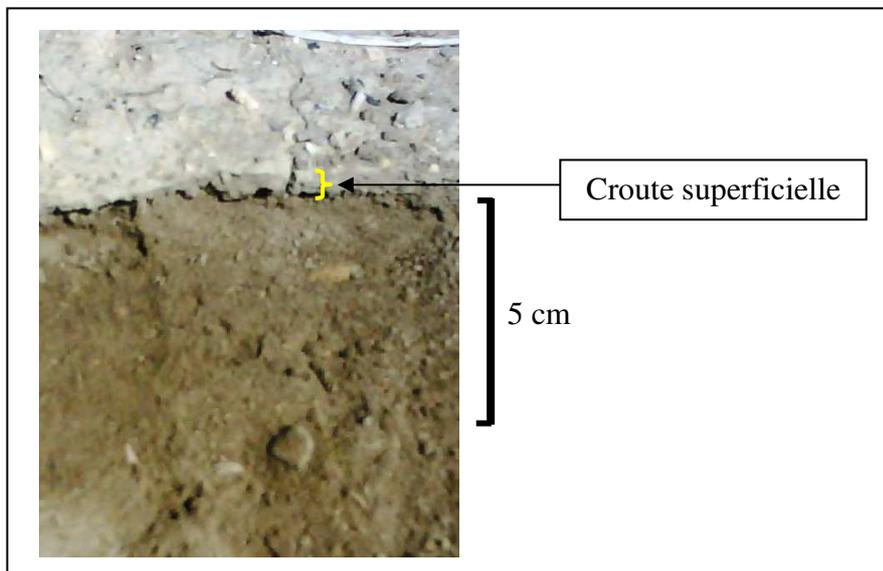


Figure 31. Photo de la croûte de battance formée dans le site 1 (prise le 16 avril 2011).

- Les conditions météorologiques ont été un peu particulières avant la troisième sortie. Sur les dix jours précédant la date d'échantillonnage, les quantités de précipitation enregistrées sont nulles. Aussi durant cette même période, on note une baisse importante de l'humidité relative qui atteint un minimum de **42%** le 15 mai, et une légère augmentation de l'évaporation journalière qui atteint un maximum de **5 mm** le 15 mai aussi. Malgré la présence d'une croûte de battance qui aide à préserver un peu d'humidité au dessous, la durée de la période de sécheresse et la demande atmosphérique croissante en humidité ont fait que les sols dans l'ensemble des sites étudiés étaient secs lors du prélèvement du 16 mai 2011 (figure 32).

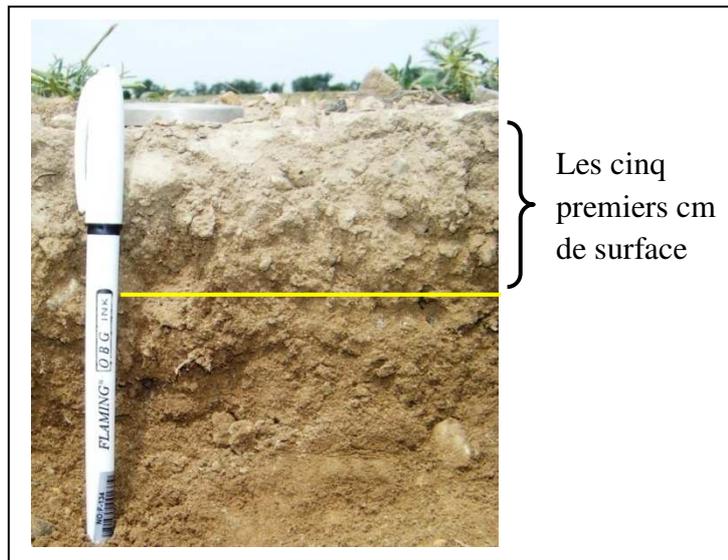


Figure 32. Photo des 15 premiers cm du sol dans le site 1 (prise le 16 mai 2011)

- Sur les dix jours précédant le dernier échantillonnage, les quantités de précipitations enregistrées sont quasi nulles. L'humidité relative a baissé rapidement de **80%** jusqu'à **50%** alors que l'évaporation augmentait de **1 à 5 mm**. Le bilan hydrique était donc négatif et l'ensemble des sols des sites étudiés était secs en surface.

1.2. Les données de terrain

1.2.1. Caractéristiques physiques des sols des cinq sites étudiés

Les résultats analytiques des sols des sites étudiés sont portés sur le tableau 9. La distribution de la taille des particules permet d'identifier la classe texturale du sol. L'analyse de la densité apparente nous renseigne sur la structure de l'horizon de surface et enfin l'analyse des humidités caractéristiques détermine la capacité de rétention du sol.

- le sol du site 1 et le sol du site 3 appartiennent à la classe texturale clay loam (USDA), ils contiennent près de 30% d'argile chacun. Le premier contient 34% de limons, soit 3% de plus par rapport au deuxième. Il contient aussi 35,8% de sable, soit 4% moins que le deuxième. Les densités apparentes sont respectivement 1,28 et 1,23. Cette légère différence peut être due au pourcentage plus élevé de la fraction sableuse dans le sol du site 3. La rétention en eau est pratiquement identique pour les deux sols. Au ***pF 0***, le sol du site 1 contient en moyenne près de 60% d'humidité tandis que le sol du site 3 contient environ 57%. Aux ***pF 2,5 ; pF 3 et pF 4,2***, la quantité d'humidité retenue pour les deux sols est presque la même avec un maximum de 1,9% de différence entre les deux sols pour le ***pF 4,2***. La réserve utile est d'environ 7% d'humidité pondérale pour les deux sols.

- le sol du site 2 et le sol du site 5 appartiennent à la classe texturale silty clay (USDA). Ils contiennent environ 50% d'argile, 40% de limon et moins de 10% de sable chacun. Leurs densités apparentes sont identiques (1,4 et 1,41 respectivement). Ces valeurs de la densité apparentes sont un peu plus faibles que la normale d'un sol à 50% d'argile qui est autour de 1,7. Cette différence est due au fait que les deux sols ont été travaillé et cultivés pendant la période de mesure. Les deux sols retiennent presque la même quantité d'eau pour tout les pF. La réserve utile pour les plantes est égale à 17% d'humidité pondérale pour les deux sols.

- le sol du site 4 contient 46% d'argile, 30% de limon et 24% de sable. La différence des pourcentages de limon et de sable par rapport aux sols des sites 2 et 5 lui attribue la classe texturale clay (USDA). La densité apparente est de 1,33 car l'horizon de surface travaillé était bien structuré lors de la mesure. A la saturation, l'humidité de ce sol est de 67% et la réserve utile aux plantes est de 16% d'humidité pondérale.

Globalement, la texture est équilibrée ou à tendance argileuse lourde. Par conséquent, la rétention en eau est importante pour l'ensemble des sols des cinq sites étudiés. La quantité d'eau liée non absorbable est assez importante, elle varie de 18% à 24% d'humidité pondérale.

Tableau 9. Résultats des analyses de caractérisation et classes texturales des cinq sites étudiés.

	Distribution de la taille des particules (%)			Classe texturale	Da	Humidités caractéristiques			
	Argile	Lf + Lg	Sf + Sg			pF = 0	pF = 2,5	pF = 3	pF = 4,2
Site 1	28,17	34,33	35,80	Clay loam	1,28	59,71	25,77	23,04	19,73
Site 2	52,00	43,75	5,14	Silty clay	1,40	70,07	30,84	26,72	23,37
Site 3	30,00	31,00	39,29	Clay loam	1,23	56,65	25,27	22,67	17,82
Site 4	45,83	29,50	23,81	Clay	1,33	67,26	29,60	27,21	23,53
Site 5	49,75	39,75	8,61	Silty clay	1,41	70,85	30,91	25,37	22,56

1.2.2. Suivi de l'humidité de surface

- Dans le site 1, nous avons prélevé un total de 16 échantillons pour mesurer l'humidité de surface le temps de passage du satellite. Sur le tableau 10, on retrouve les statistiques descriptives des valeurs de l'humidité volumique du sol pendant la période de suivi. La valeur maximale et minimale, la moyenne, la médiane et l'écart-type ont été calculés.

Les valeurs moyennes de θ sont 22%, 21%, 6% et 4% pour les mois de mars, avril, mai et juin respectivement. L'intervalle de variation de l'humidité varie d'un mois à l'autre, mais ne dépasse pas 9% d'humidité entre la valeur maximum et minimum.

Tableau 10. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l'humidité volumique de surface dans le site 1.

SI	Humidité volumique de surface θ %			
	17-mars	16-avril	16-mai	15-juin
Max.	25,12	26,32	8,90	6,28
Min.	18,56	17,39	4,25	2,62
Moyenne	21,95	21,00	6,33	4,43
Ecart-type	2,38	2,44	1,43	1,18

Comme le montre l'histogramme de la figure 33, la valeur moyenne la plus faible de l'humidité volumique du sol en surface est celle du mois de juin. L'écart-type entre les 16 échantillons prélevés est d'environ 1%. Donc, pour utiliser l'approche de détection des changements, nous avons pris la scène du mois de juin pour représenter l'état sec du sol dans la relation $[(\sigma^0_{\text{humide}} - \sigma^0_{\text{sec}}) = f(\theta_v)]$.

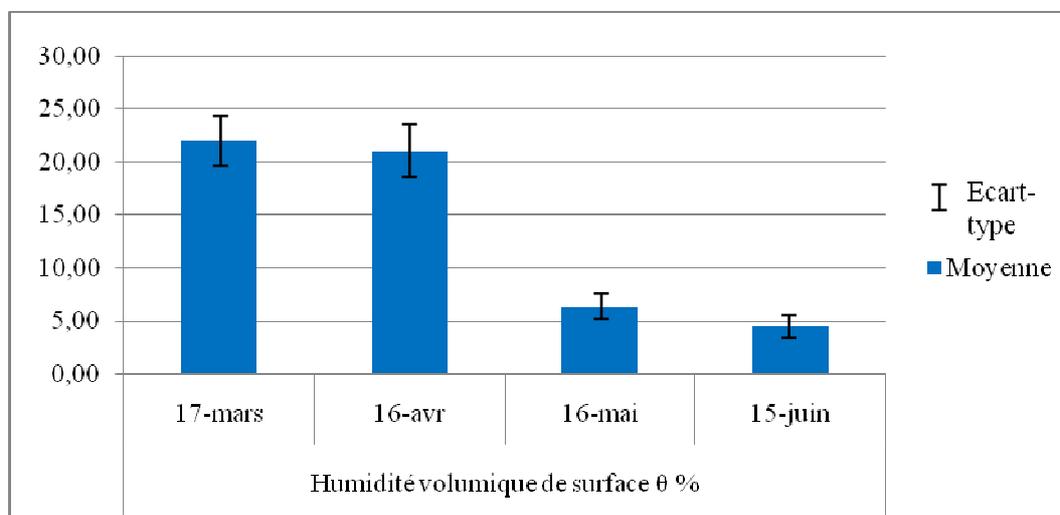


Figure 33. Humidités volumiques moyennes et écart-type des mesures de terrain dans le site 1.

- Dans le site 2, nous avons prélevé un total de 9 échantillons pour la mesure de l'humidité de surface à chaque date de passage du satellite. Sur le tableau 11, on retrouve les statistiques descriptives des valeurs de l'humidité volumique du sol pendant la période de suivi. Les valeurs moyennes de θ sont 33%, 26%, 14% et 14% pour les mois de mars, avril, mai et juin

respectivement. L'intervalle de variation de l'humidité est plus petit que celui trouvé dans le site 1. La différence entre la valeur maximum et minimum d'humidité ne dépasse pas 5%.

Tableau 11. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l'humidité volumique de surface dans le site 2.

S2	<i>Humidité volumique de surface θ %</i>			
	17-Mars	16-Avril	16-Mai	15-Juin
Max.	35,72	27,57	16,02	16,69
Min.	30,09	23,69	12,28	11,27
Moyenne	33,39	26,17	14,25	14,33
Écart-type	1,84	1,34	1,26	1,68

Sur l'histogramme de la figure 34, on remarque une légère différence entre la valeur de l'humidité moyenne et de l'écart-type des mois mai et juin. L'intervalle de variation des valeurs mesurées de θ et l'écart-type sont plus petits en mai. Par conséquent, nous avons pris la scène de ce mois comme référence lors de l'utilisation de l'approche de détection des changements.

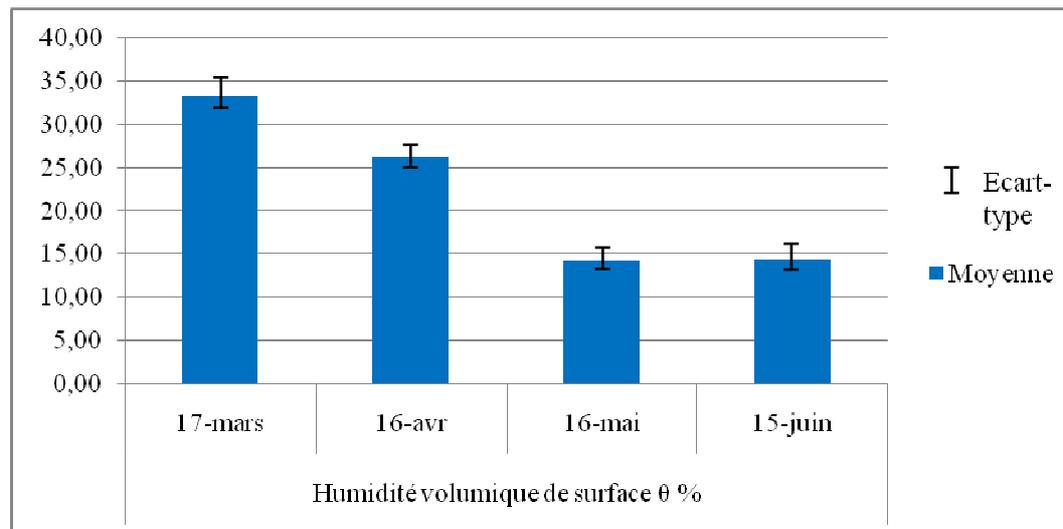


Figure 34. Humidités volumiques moyennes et écart-type des mesures de terrain dans le site 2.

- Dans le site 3, nous avons prélevé un total de 14 échantillons pour la mesure de l'humidité de surface. Sur le tableau 12, on retrouve les statistiques descriptives des valeurs de l'humidité volumique du sol pendant la période de suivi. Les valeurs moyennes de θ sont 18%, 17%, 3% et 4% pour les mois de mars, avril, mai et juin respectivement. L'intervalle de variation de l'humidité est réduit avec une différence entre la valeur maximum et minimum d'humidité qui ne dépasse pas 5%.

Tableau 12. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 3.

S3	<i>Humidité volumique de surface θ %</i>			
	17-Mars	16-Avril	16-Mai	15-Juin
Max.	20,37	19,65	3,91	4,44
Min.	16,94	14,27	2,61	3,04
Moyenne	18,49	17,11	3,21	3,65
Écart-type	1,03	1,78	0,41	0,45

Sur l’histogramme de la figure 35, la plus petite valeur d’humidité moyenne et de l’écart-type sont celles du mois de mai. Donc, nous avons choisi la scène de ce mois comme référence représentant l’état sec du sol pour l’application de l’approche de détection des changements.

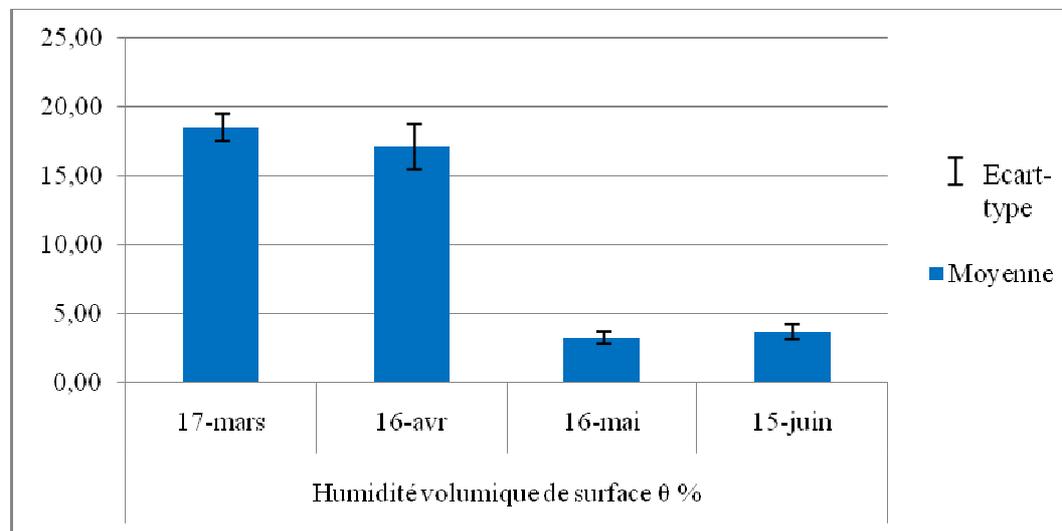


Figure 35. Humidités volumiques moyennes et écart-type des mesures de terrain dans le site 3.

- la zone d’échantillonnage dans le site 4 correspond à une parcelle cultivée en irrigué. La culture installée (la carotte) est du type herbacé avec une hauteur maximum de 40 cm en pleine croissance. L’agriculteur utilisait l’irrigation par aspersion et vu que la parcelle est petite (2ha), il n’a installé qu’une ligne qu’il déplaçait chaque jour pour couvrir toute la parcelle (figure 36).



Figure 36. Photo de l'irrigation par aspersion dans le site 4 (prise le 15 juin 2011).

Sur la figure 37 on retrouve le schéma des lignes d'irrigation et leurs dates respectives peu avant l'acquisition des images du 16 mai et du 15 Juin. Le gradient de bleu du clair au foncé indique des valeurs croissantes de l'humidité.

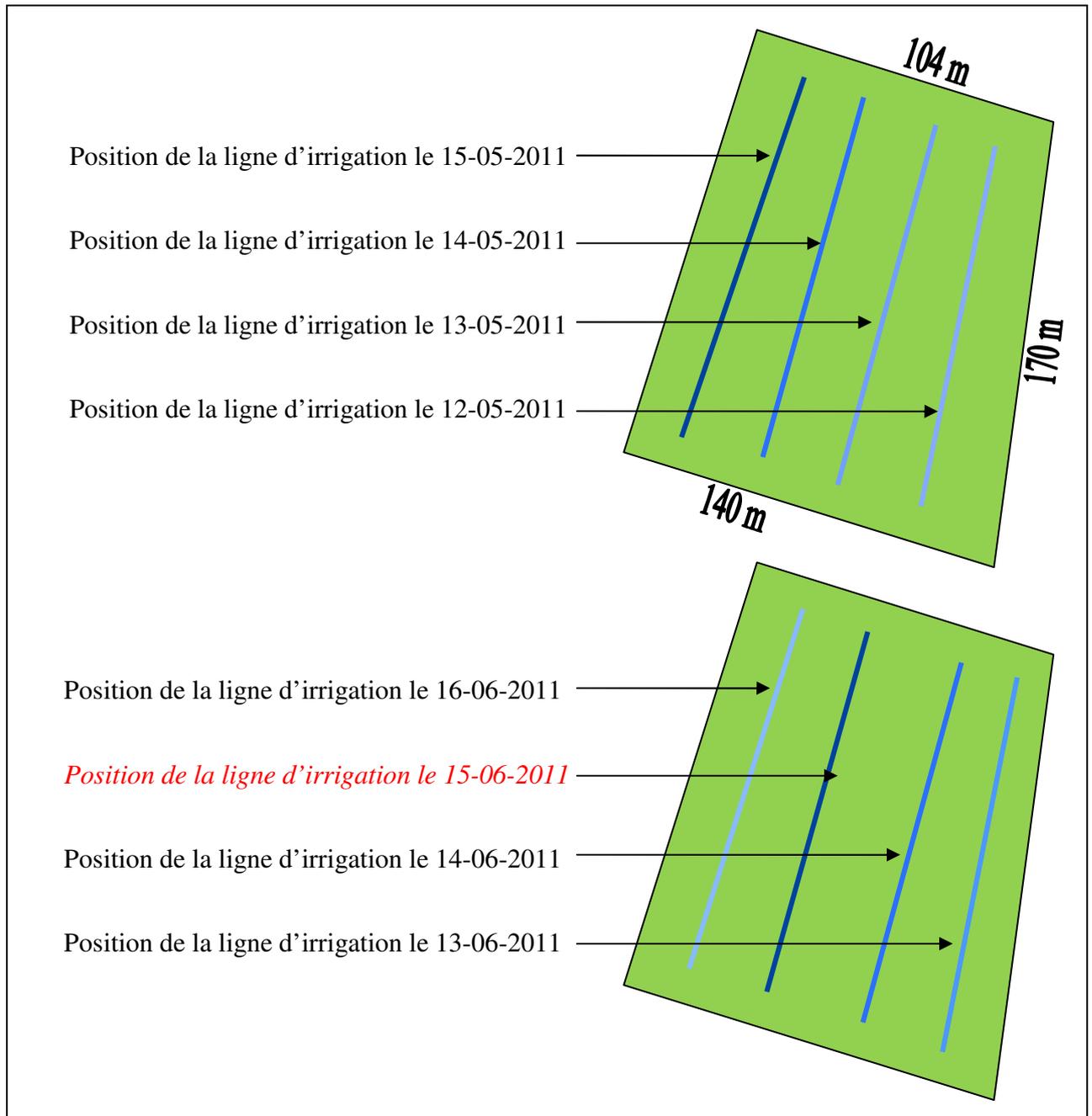


Figure 37. Schéma des lignes d'irrigation dans le site 4 peu avant les dates de prélèvement.

Nous avons prélevé au total 16 échantillons pour la mesure de l'humidité de surface en mai et en juin. Les statistiques descriptives des valeurs de l'humidité volumique du sol montrent que θ a varié entre 21% et 33% lors du prélèvement du 16 mai et entre 19% et 42% lors du prélèvement du mois de juin (tableau 13). L'écart-type est plutôt faible entre les valeurs de θ du mois de mai mais élevé entre les valeurs de θ du mois de juin.

Tableau 13. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 4.

S4	<i>Humidité volumique de surface θ %</i>	
	16-mai	15-juin
Max.	33,07	41,78
Min.	21,68	19,34
Moyenne	25,98	32,13
Médiane	25,36	31,4
Écart-type	3,53	7,16

L’approche de détection des changements n’a pas pu être utilisée car nous n’avons pas de scène représentant l’état sec du sol dans le site 4.

- de même que pour le site 4, l’irrigation par aspersion a été utilisée dans le site 5. L’agriculteur a installé aussi une seule ligne d’irrigation qu’il déplaçait chaque jour pour couvrir toute la parcelle en une semaine.

Douze échantillons destinés à la mesure de l’humidité du sol en surface ont été prélevés dans le site 5. Les statistiques descriptives des résultats obtenus sont portées sur le tableau 14. La scène du mois de mai a été prise une journée après irrigation de la parcelle. Il y avait un gradient des valeurs d’humidité de surface avec un minimum de 25% et un maximum de 35%. L’écart-type entre ces valeurs reste plutôt faible. La parcelle n’était pas irriguée pendant le mois de juin et vu que le climat était très sec, le sol l’était aussi en surface. Les valeurs de l’humidité de surface trouvées varient entre 6% et 10% et l’écart-type est très faible (1,67).

Tableau 14. Statistiques descriptives des valeurs mesurées de l’humidité volumique de surface dans le site 5.

S5	<i>Humidité volumique de surface θ %</i>	
	16-Mai	15-Juin
Max.	34,84	9,66
Min.	24,58	5,55
Moyenne	29,76	7,24
Médiane	29,52	6,50
Écart-type	3,47	1,67

1.3. Les données de télédétection (Envisat, ASAR)

1.3.1. Effets du filtre de chatoiement

L'utilisation des filtres adaptés permet de supprimer le bruit sur les images radar. Cependant, la taille de la fenêtre du filtre affecte la résolution spatiale des images. Un effet visuel de lissage est d'autant plus important que la taille de la fenêtre du filtre augmente.

Lors de l'application du filtre de chatoiement sur les images radar acquises, nous avons utilisé quatre tailles différentes de la fenêtre mobile du filtre (5*5, 7*7, 9*9 et 11*11 pixels). Nous avons ensuite comparé les images calibrées non filtrées aux images calibrées et filtrées. Les statistiques descriptives des valeurs du coefficient de rétrodiffusion sont portés sur le tableau suivant.

Tableau 15. Statistiques descriptives des valeurs de σ^0 (dB) des images non filtrées et des images filtrées.

σ^0 (dB)		image non filtrée	images filtrées			
			F 5*5	F 7*7	F 9*9	F 11*11
Site 1 (Mars)	Max.	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29
	Min.	-21,02	-16,63	-16,59	-14,94	-14,65
	Moyenne	-10,89	-10,82	-10,81	-10,79	-10,82
	Écart-type	2,60	1,84	1,79	1,74	1,65
Site 2 (Mars)	Max.	-5,48	-5,73	-6,07	-6,36	-6,49
	Min.	-21,12	-20,05	-17,97	-19,20	-19,66
	Moyenne	-12,55	-12,28	-12,29	-12,29	-12,30
	Écart-type	2,68	1,97	1,83	1,71	1,68

Plus la fenêtre est grande, plus l'intervalle de variation des valeurs du coefficient de rétrodiffusion se réduit et l'écart-type baisse. Les valeurs moyennes de σ^0 ne changent pas beaucoup quand on modifie la taille de la fenêtre. Elles sont cependant toutes plus petite que celles des images non filtrées. Enfin, l'écart-type baisse automatiquement quand il s'agit d'un intervalle plus réduit.

La figure 38 montre l'effet visuel du filtre de chatoiement sur la même portion de l'image radar. On observe un aspect granulaire sur l'image (a) car elle n'a pas été filtrée. Sur les images (b), (c), (d) et (e), nous avons utilisé le filtre de chatoiement du logiciel BEST avec les tailles de fenêtre 5*5, 7*7, 9*9 et 11*11 pixels respectivement. Il est clair que le lissage augmente avec la taille de la fenêtre car le coefficient de rétrodiffusion du pixel central est calculé à chaque fois à partir

d'un voisinage plus étendu. Par conséquent, la résolution spatiale des images filtrées se dégrade d'autant plus que la taille de la fenêtre du filtre est grande (Thoma *et al.*, 2008).

Si on prend en considération les dimensions des pixels sur les images Envisat (12,5*12,5m), on trouve que la résolution spatiale d'une image filtrée 5*5pixels est de 75m alors que celle d'une image filtrée 11*11pixels est de 137,5m. Pour la cartographie de l'humidité du sol, nous avons utilisé la plus petite fenêtre du filtre pour avoir la meilleure résolution spatiale.

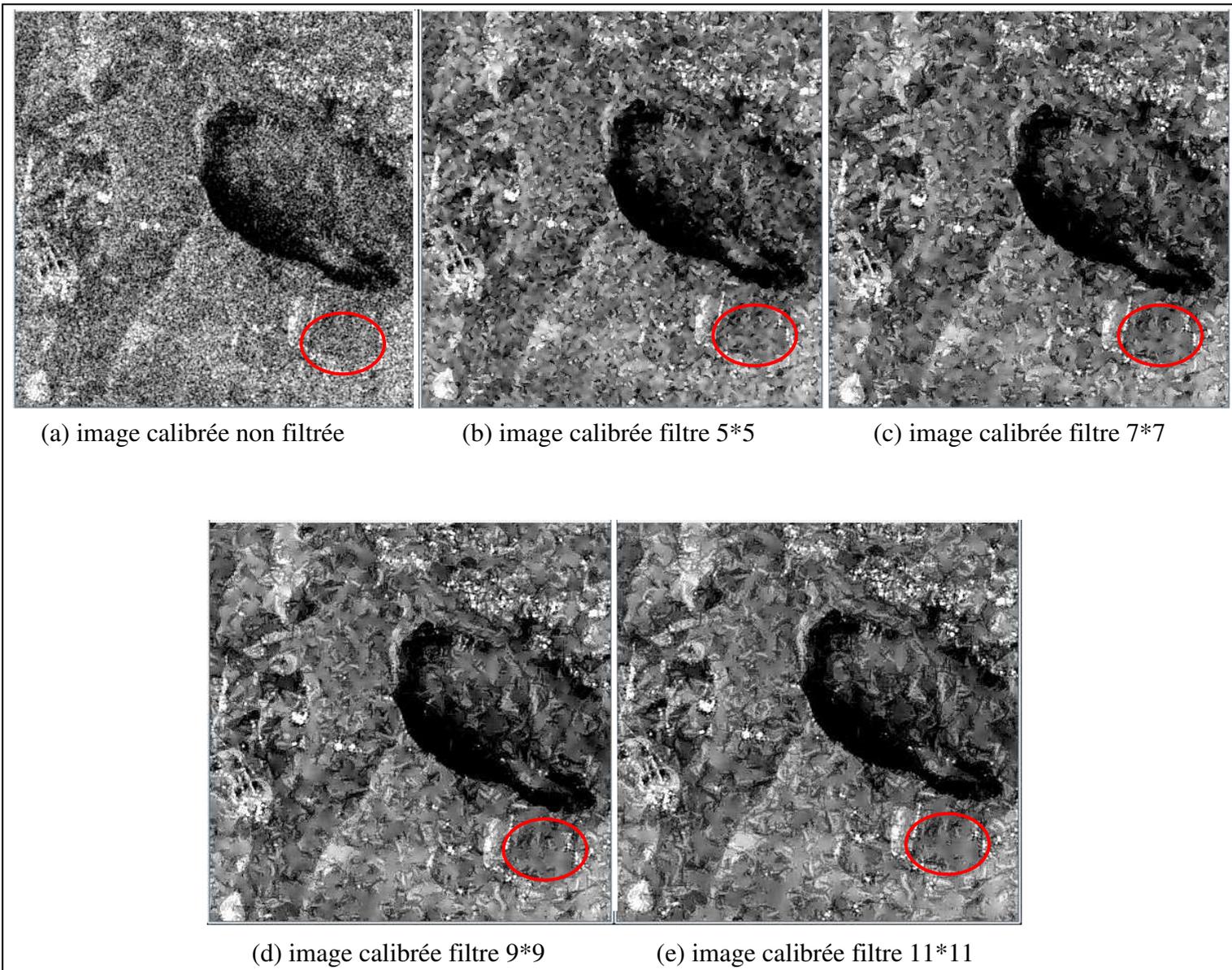


Figure 38. Comparaison entre l'image calibrée non filtrée et les images calibrées filtrées (5*5, 7*7, 9*9 et 11*11pixels)

1.3.2. Evolution temporelle du coefficient de rétrodiffusion

A partir des portions d'image de chaque site, nous avons calculé les statistiques descriptives du coefficient de rétrodiffusion pendant la période de suivi. Les valeurs maximum et minimum, la valeur moyenne et l'écart-type sont portés sur le tableau suivant (tableau 16). L'intervalle de variation du coefficient de rétrodiffusion varie d'un site à un autre et d'un mois à l'autre. Les valeurs maximum et minimum du coefficient de rétrodiffusion sont pratiquement toujours dues à des conditions particulières sur le terrain, à des erreurs géométriques ou à des erreurs radiométriques. La valeur moyenne et l'écart-type nous renseignent mieux sur la tendance de variation du coefficient de rétrodiffusion dans chaque site.

La plus faible valeur de σ^0 est celle du mois de juin dans le site 3 (-24,71 dB), et la plus grande valeur est aussi celle du mois de juin dans le site 3 (0,41 dB). Les valeurs moyenne pour l'ensemble varient entre -13,51 dB et -10,59 dB. Enfin, l'écart-type est compris entre 1,6 et 2 sauf pour les sites 4 et 5 pendant le mois de mai ou nous avons un écart-type de 2,42 et 2,36 respectivement. Ces deux dernières valeurs indiquent un écart plus important entre les valeurs de σ^0 et la moyenne. Ceci est dû à l'écart-type important entre les valeurs d'humidité dans ces deux sites irrigués.

Tableau 16. Statistiques descriptives des valeurs de σ^0 dans les cinq sites pendant la période de suivi.

		Site 1	Site 2	site 3	Site 4	Site 5
Mars	Max.	-3,29	-5,73	-6 28		
	Min.	-16,63	-20,05	-24,69		
	Moyenne	-10,82	-12,28	-12,53		
	Écart-type	1,84	1,97	1,60		
Avril	Max.	-5,45	-6,53	-6,61		
	Min.	-15,30	-19,83	-23,44		
	Moyenne	-10,59	-12,92	-12,48		
	Écart-type	1,59	2,03	1,79		
Mai	Max.	-8,17	-8,14	-6,21	-7,08	-6,71
	Min.	-16,52	-23,00	-21,82	-17,99	-18,46
	Moyenne	-11,95	-13,62	-12,31	-13,51	-13,01
	Écart-type	1,59	1,92	1,70	2,42	2,36
Juin	Max.	-7,26	-6,56	0,41	-7,92	-5,70
	Min.	-24,36	-21,59	-24,71	-16,96	-19,55
	Moyenne	-11,81	-13,07	-12,09	-12,31	-12,14
	Écart-type	1,95	1,79	1,99	1,76	2,05

L'évolution temporelle du coefficient de rétrodiffusion est difficile à interpréter à partir des statistiques descriptives. Les données du tableau 16 nous indiquent uniquement une tendance décroissante dans le temps des valeurs moyennes de σ^0 dans les sites 1 et 2, et une tendance croissante dans le temps des valeurs moyennes de σ^0 dans les sites 3, 4 et 5.

Afin de mieux expliquer la dynamique du coefficient de rétrodiffusion dans les différents sites par rapport aux conditions locales et par rapport aux pratiques agricoles, notamment le travail du sol et de l'irrigation, nous analysons et interprétons les histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans chaque site à part durant la période de suivi.

• Site 1

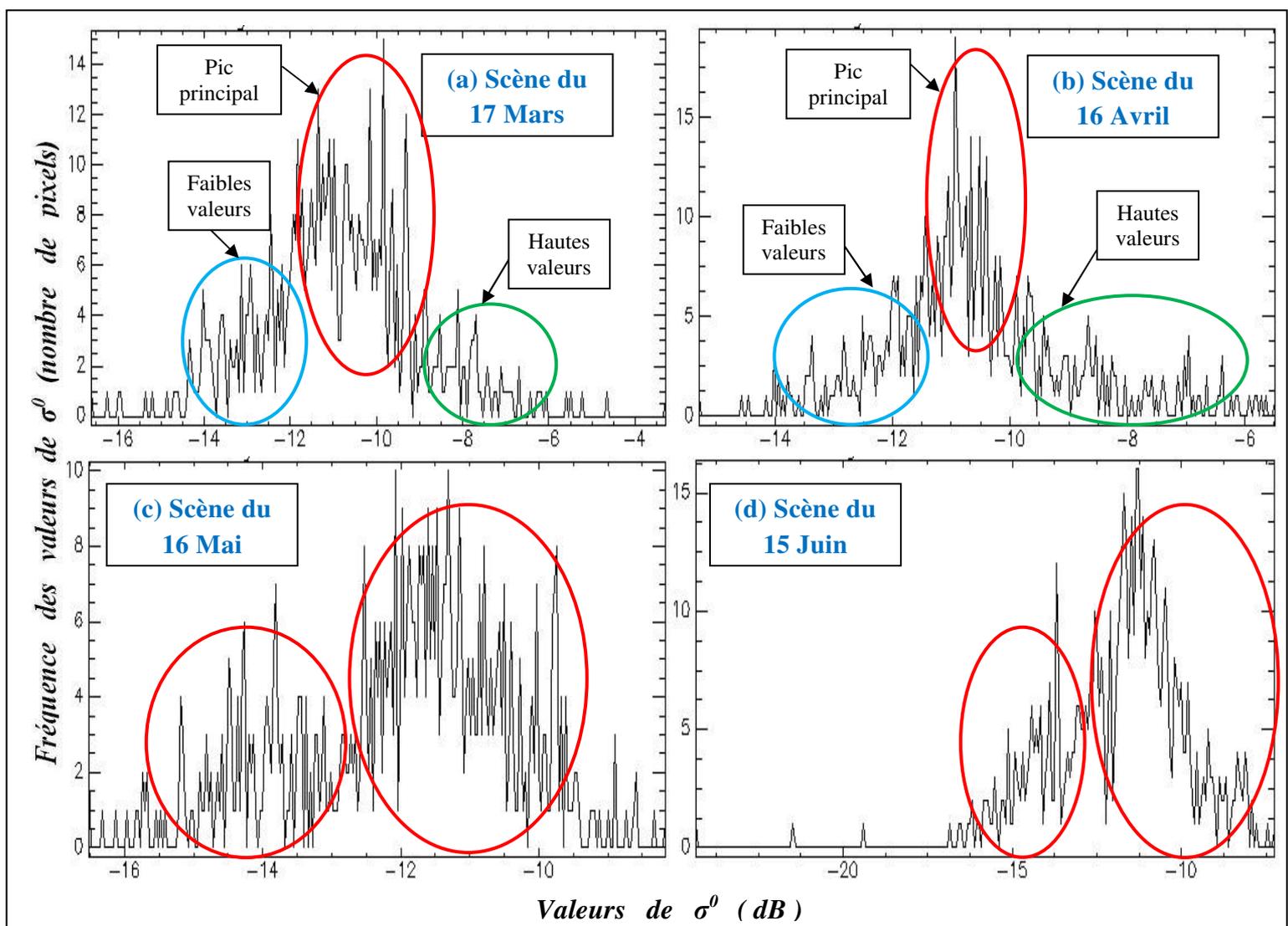


Figure 39. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 1 durant la période de suivi.

L'analyse des histogrammes de fréquence des portions d'image des mois de : mars, avril, mai et juin (figure 39) nous permet de faire les observations suivantes :

- On constate une similitude de la tendance de fréquence entre la scène du mois de mars et celle du mois d'avril et entre la scène du mois de mai et celle du mois de juin.

Le sol du site 1 étant non travaillé et non cultivé pendant l'année 2011, sa rugosité de surface et son humidité sont les deux facteurs qui affectent le coefficient de rétrodiffusion radar. L'évolution naturelle de la rugosité de surface entre deux dates d'acquisition successives est proportionnelle à la quantité et à l'intensité des pluies enregistrées. Entre le 17 mars et le 16 avril, deux averses ont été enregistrées par la station climatique de Ain Sfia. La première, de 10 mm, n'était pas intense alors que la deuxième (14mm) l'était un peu. Ensuite entre le 16 avril et le 16 mai, deux autres averses de 34mm et 17mm ont été enregistrées. Enfin entre le 16 mai et le 15 juin, deux averses de faible intensité (29mm et 15mm) ont été enregistrées. Les changements de rugosité ont été donc faibles entre la première et la deuxième scène, ensuite assez importants entre la deuxième et la troisième scène et enfin très faibles entre la troisième et la quatrième scène. Aussi, l'humidité volumique moyenne a légèrement baissé de 22% à 21% entre le mois de mars et le mois d'avril ensuite de 6% à 4% entre le mois de mai et le mois de juin.

- L'intervalle de variation de σ^0 est plus réduit que celui indiqué par ses valeurs maximum et minimum. Le coefficient de rétrodiffusion dans la zone d'intérêt varie entre -15dB et -6dB, ensuite entre -14dB et -6dB, puis entre -16dB et -9,5dB et enfin entre -16dB et -9dB sur les scènes du 17 mars, du 16 avril, du 16 mai et du 15 juin respectivement.

La diminution de l'intervalle de variation des valeurs de σ^0 après le mois d'avril est principalement due à la baisse considérable de l'humidité de surface. La moyenne des mesures de terrain est passée de 21% à 6% entre le 16 avril et le 16 mai. Par ailleurs, la rugosité de surface était beaucoup affectée à cause des pluies intenses enregistrées entre ces deux dates. Ces changements expliquent aussi la différence de la tendance de fréquence entre les histogrammes des mois de mai et de juin par rapport à ceux de mars et avril.

- On observe un pic regroupant la majorité des pixels sur l'histogramme du mois de mars et sur celui du mois d'avril. Deux petits groupes de pixels représentant les fortes valeurs et les faibles valeurs de σ^0 se retrouvent de part et d'autre du pic central. Nous constatons une légère différence de la forme générale entre les deux histogrammes.

Sur le terrain les faibles valeurs de σ^0 représentent l'action conjuguée d'une faible humidité de surface et d'une faible rugosité. Par ailleurs, les fortes valeurs de σ^0 reflètent l'effet conjoint d'une rugosité importante et d'une teneur élevée en eau à la surface. Le pic central sur l'histogramme du mois d'avril est un peu moins large et plus long que celui

de l'histogramme du mois de mars. Aussi, nous avons plus de pixels dans le groupe des fortes valeurs de σ^0 sur l'histogramme du mois d'avril. Nous pouvons conclure que ces différences sont dues aux changements de la rugosité de surface et à la légère baisse de l'humidité volumique entre le 17 mars et le 16 avril.

- L'histogramme du mois de mai et celui du mois de juin présentent chacun deux pics de hauteur et de largeur différentes. Le premier pic sur les deux histogrammes regroupe près de 3/4 des pixels ayant tous de fortes valeurs comprises entre -13dB et -9dB. Le deuxième pic regroupe près de 1/4 des pixels ayant tous des faibles valeurs comprises entre -16dB et -13dB. Il est à noter qu'il y a quand même une petite différence de forme des deux pics entre la scène du mois de mai et celle du mois de juin.

Sur les scènes du mois de mai et juin, le coefficient de rétrodiffusion est principalement affecté par la rugosité de surface. Le pic regroupant 3/4 des pixels reflète principalement l'effet d'une rugosité importante. Par ailleurs, l'absence de fortes valeurs de σ^0 et l'apparition d'un deuxième pic regroupant les faibles valeurs de σ^0 sont dues à la baisse importante de l'humidité de surface.

- **Site 2**

Les histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 des quatre scènes sont portés sur la figure 40. On peut faire les observations suivantes :

- L'intervalle de variation des valeurs du coefficient de rétrodiffusion radar est plus réduit que celui défini par sa valeur maximum et minimum. Dans la zone d'intérêt, σ^0 varie entre -17dB et -6dB, ensuite entre -17,5dB et -7dB, puis entre -18dB et -9dB et enfin entre -18dB et -9dB sur les scènes du 17 mars, du 16 avril, du 16 mai et du 15 juin respectivement.
- Sur les quatre histogrammes, un seul pic représentant une thématique unique regroupe la majorité des pixels. Cependant, les valeurs de σ^0 sont de plus en plus décalées vers la gauche avec le temps.
- La forme de l'histogramme du mois de mars ressemble à celle de l'histogramme du mois d'avril. Les deux portions d'image sont assez contrastées.
- La forme de l'histogramme du mois de mai ressemble à celle de l'histogramme du mois de juin. Mais sur la scène du 15 juin, nous avons plus de pixels ayant des valeurs comprises entre

-12dB et -9dB. les deux portions d'images du mois de mai et juin sont moins contrastées que celles du mois de mars et avril.

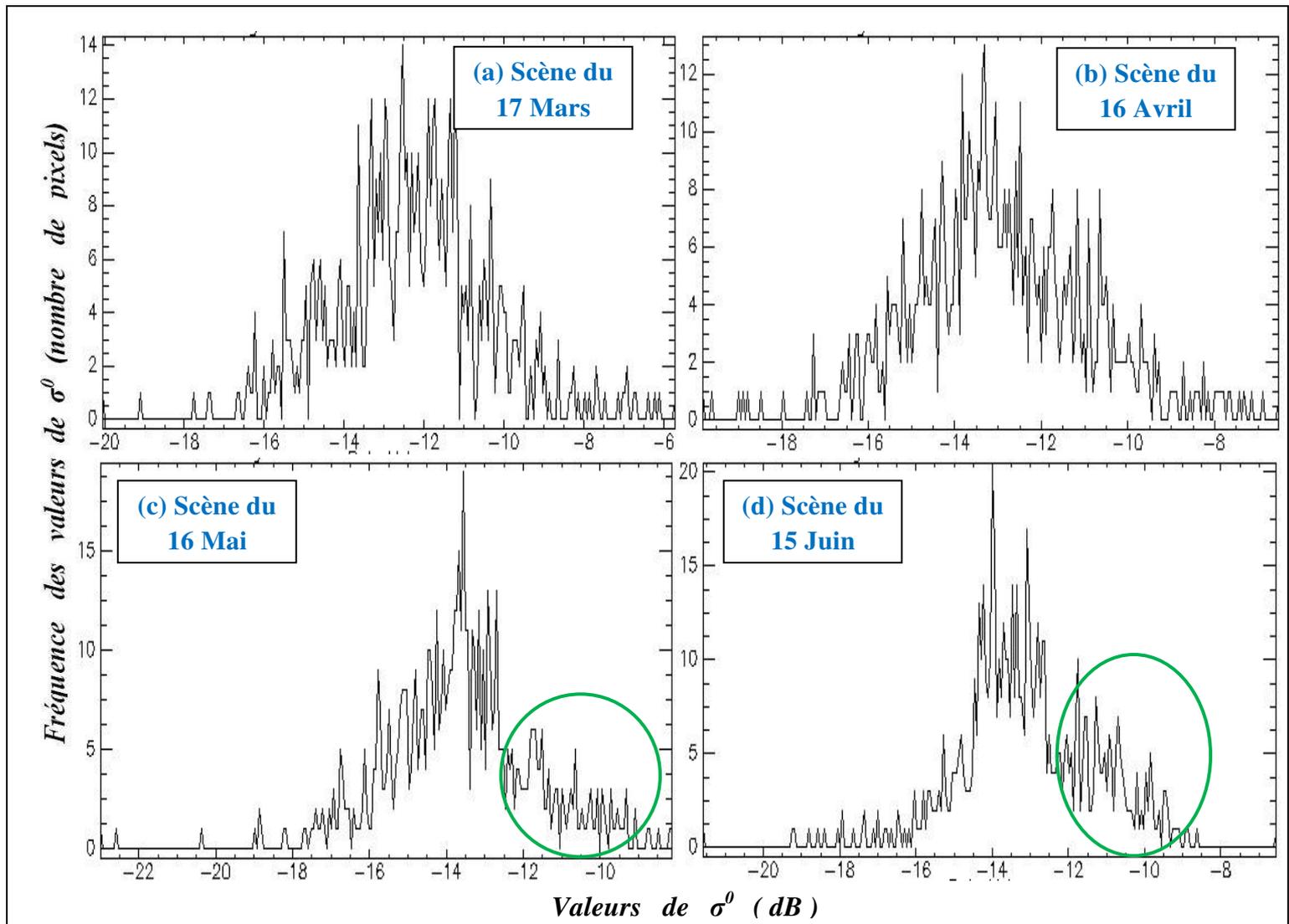


Figure 40. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 2 durant la période de suivi.

Le sol du site 2 a été travaillé et cultivé en blé dur d'hiver pendant l'année 2010-2011. Le travail conventionnel a été appliqué sur toute la parcelle. Les facteurs affectant le signal radar sont donc l'humidité du sol, la rugosité de surface et la biomasse végétale. L'évolution temporelle de la rugosité de surface entre le mois de mars et le mois de juin a été très faible car le sol était bien couvert et très peu exposé à l'action des pluies. Par conséquent, l'effet de la rugosité de surface était presque le même sur les quatre scènes. Entre le 17 mars et le 16 avril, la biomasse végétale a légèrement augmenté mais l'humidité de surface moyenne a baissé d'environ 6%. Ceci explique le petit décalage vers les faibles valeurs de l'histogramme du mois d'avril par rapport à celui du mois de mars. Ensuite entre le 16 avril et le 16 mai, la

biomasse végétale a considérablement augmenté alors que l'humidité moyenne a baissé de 12%. Ces changements ont affecté la tendance de fréquence des pixels sur l'histogramme du mois de mai. Les valeurs de σ^0 se sont concentrées plus entre -15dB et -12,5dB et le décalage vers les faibles valeurs est encore plus important à cause de la baisse considérable de l'humidité de surface. Enfin entre le 16 mai et le 15 juin, l'humidité de surface n'a pas beaucoup changé mais la biomasse végétale a augmenté. Cette augmentation a affecté l'histogramme du mois de juin où nous avons noté plus de pixels ayant des valeurs de σ^0 comprises entre -12dB et -9dB.

- **Site 3**

Sur les histogrammes de fréquence du site 3 (figure 41), nous avons fait les observations suivantes :

- L'intervalle de variation du coefficient de rétrodiffusion radar est pratiquement le même sur les quatre histogrammes. Les valeurs de σ^0 ont varié entre -17,5dB et -7,5dB. Cependant, les portions d'image des quatre dates d'acquisition sont faiblement contrastées.
- Un seul pic représentant une seule thématique est observé sur les quatre histogrammes. Cependant, un petit décalage vers les faibles valeurs de σ^0 est observé sur l'histogramme du mois d'avril par rapport à celui du mois de mars. Ensuite sur l'histogramme du mois de mai, le pic des valeurs de σ^0 devient plus large et s'étale sur l'intervalle [-14dB, -10dB]. Enfin sur l'histogramme du mois de juin, la forme du pic change en terme de hauteur et de largeur. Le décalage observé est plutôt vers les fortes valeurs de σ^0 par rapport à l'histogramme du mois de mai.

Le sol du site 3 a été travaillé et cultivé en blé dur de printemps pendant l'année 2011. Le travail conventionnel a été appliqué sur toute la parcelle. Les facteurs affectant le signal radar sont donc l'humidité du sol, la rugosité de surface et la biomasse végétale. Comme dans le site 2, l'évolution temporelle de la rugosité de surface entre le mois de mars et le mois de juin a été très faible car le sol était très peu exposé à l'action des pluies. Par conséquent, l'effet de la rugosité de surface était presque le même sur les quatre scènes acquises. Entre le 17 mars et le 16 avril, la biomasse végétale augmente, mais la baisse de l'humidité du sol cause une petite chute des valeurs de σ^0 . Ensuite l'augmentation considérable de la biomasse végétale entre le 16 avril et le 16 mai et la chute de l'humidité de surface de 17% à 3% justifient la différence de forme de l'histogramme du mois de mai par rapport à celui du mois d'avril.

Enfin l'accroissement des valeurs de σ^0 sur l'histogramme du mois de juin est du à l'augmentation considérable de la biomasse végétale et à une légère hausse de l'humidité de surface.

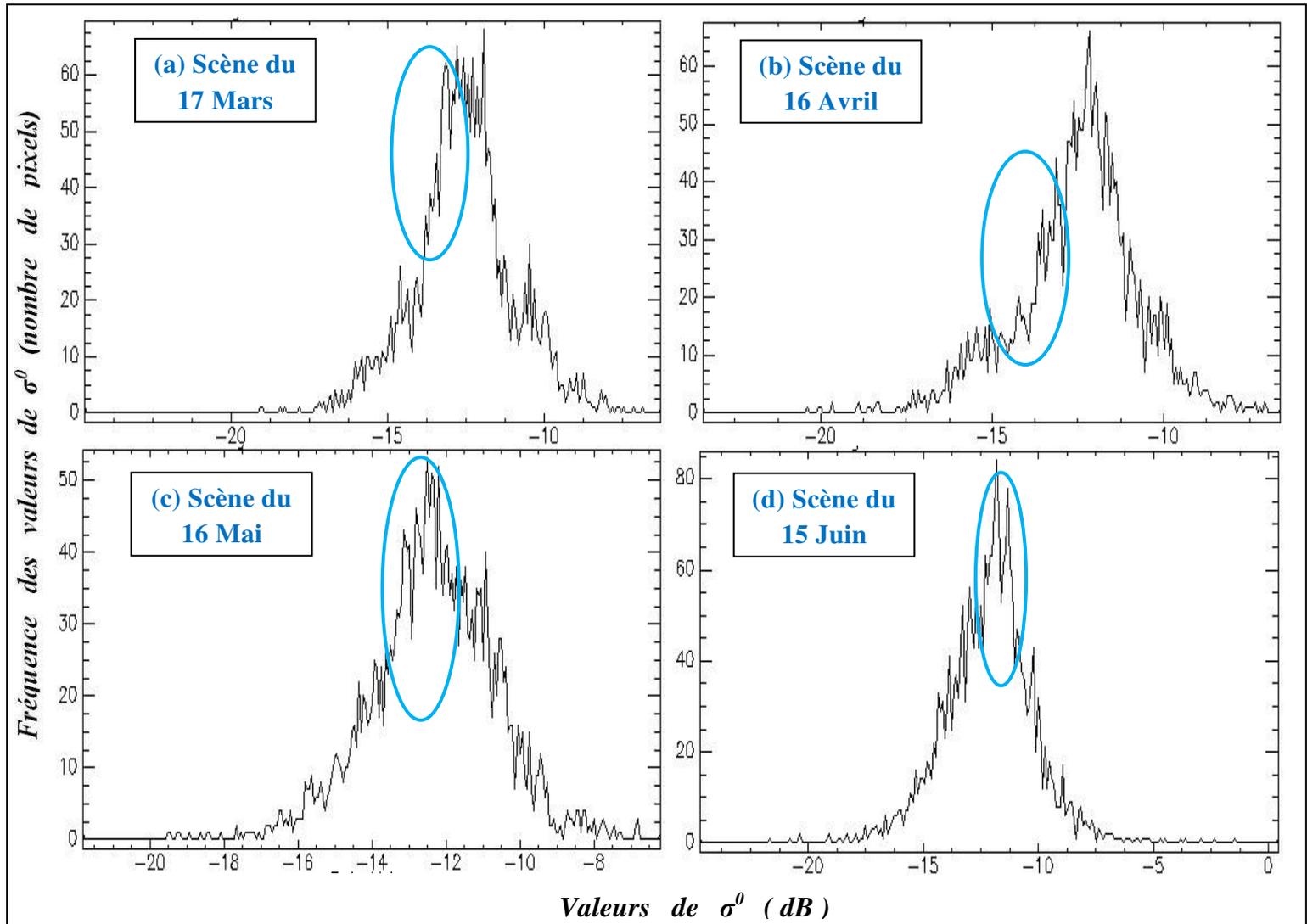


Figure 41. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 3 durant la période de suivi.

- **Site 4**

Sur la figure 42, nous avons les histogrammes de fréquence des valeurs du coefficient de rétrodiffusion radar dans le site 4. Les observations suivantes peuvent être faites :

- Les histogrammes des mois de mai et juin présentent trois groupes distincts de pixels représentant chacun une thématique différente.

- Sur l'histogramme du mois de mai, plus de 60% des pixels ont des valeurs de σ^0 comprises entre -17dB et -13,5dB ; 20% des pixels ont des valeurs de σ^0 comprises entre -10,5dB et -7dB et le reste des pixels ont des valeurs de σ^0 comprises entre -13,3dB et -11dB.

La zone d'échantillonnage dans le site 4 correspond à une parcelle irriguée. Les facteurs affectant le coefficient de rétrodiffusion radar sont l'humidité du sol, la rugosité de surface et le couvert végétal. Les trois groupes de pixels appartenant à différents intervalles représentent des classes différentes d'humidité de surface.

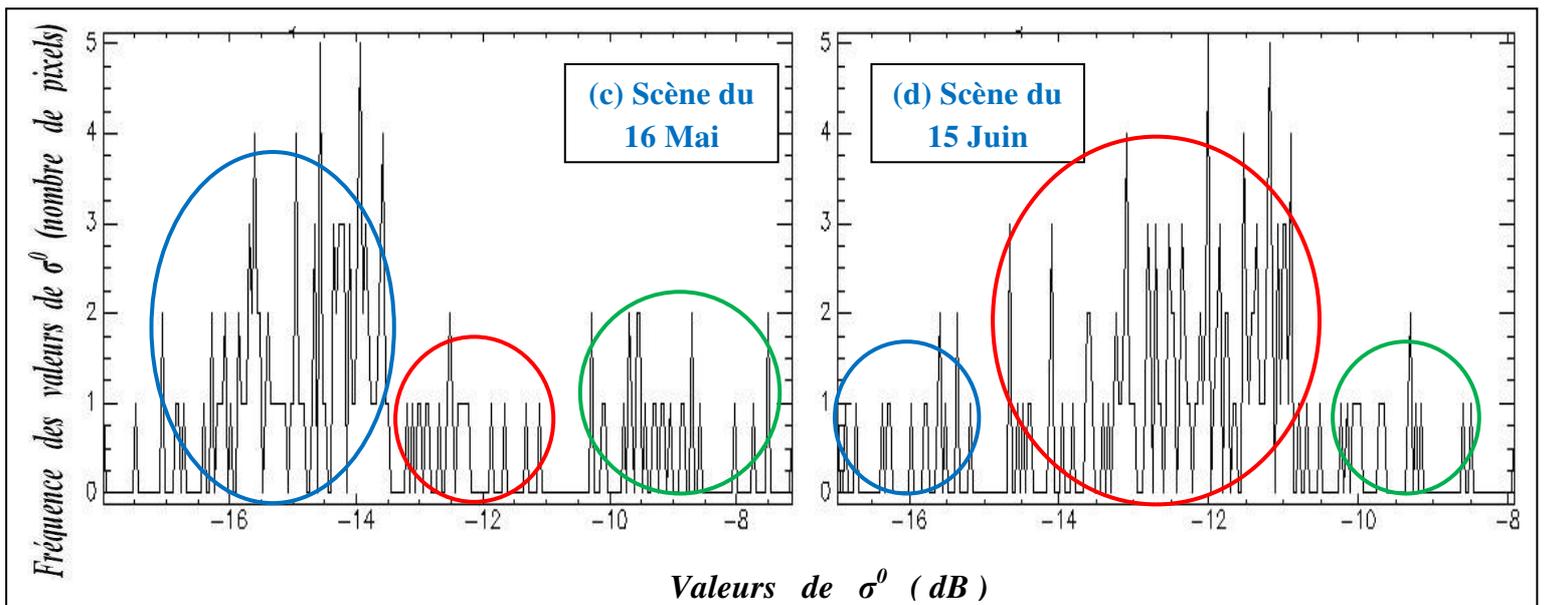


Figure 42. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 4 durant la période de suivi.

- Sur l'histogramme de mois de juin, environ 80% des pixels appartiennent à l'intervalle [-15dB, -10.5dB]. 10% des pixels appartiennent à l'intervalle [-17dB, -15dB] et le reste des pixels appartiennent à l'intervalle [-10.3dB, -8dB].

Chacun des groupes de pixels sur l'histogramme du mois de juin représente un niveau d'humidité sur la parcelle irriguée. La différence de distribution des pixels entre le mois de mai et le mois de juin est principalement due à la répartition des valeurs d'humidité. En effet, θ varie entre 22% et 33% au mois de mai et entre 5% et 42% au mois de juin.

- **Site 5**

L'analyse des histogrammes de fréquence des valeurs du coefficient de rétrodiffusion radar dans le site 5 nous a permis de faire les observations suivantes :

- l'intervalle de variation des valeurs de σ^0 passe de [-18dB, -7dB] au mois de mai à [-17dB, -7dB] au mois de juin.
- Sur la scène du 16 mai, trois pics représentent trois groupes distincts de valeurs du coefficient de rétrodiffusion radar. Près de 10% des pixels appartiennent à l'intervalle [-10dB, -8.5dB], 13% des pixels appartiennent à l'intervalle [-11.2dB, -10dB] et 75% à l'intervalle [-18dB, -11.2dB].

Sur la portion d'image qui couvre le site 5, les facteurs affectant le signal radar sont l'humidité du sol, la rugosité de surface et la biomasse végétale. La pratique de l'irrigation peu avant le 16 mai nous a donné un gradient d'humidité lors du prélèvement. Les trois pics de l'histogramme du mois de mai représentent donc chacun une classe d'humidité.

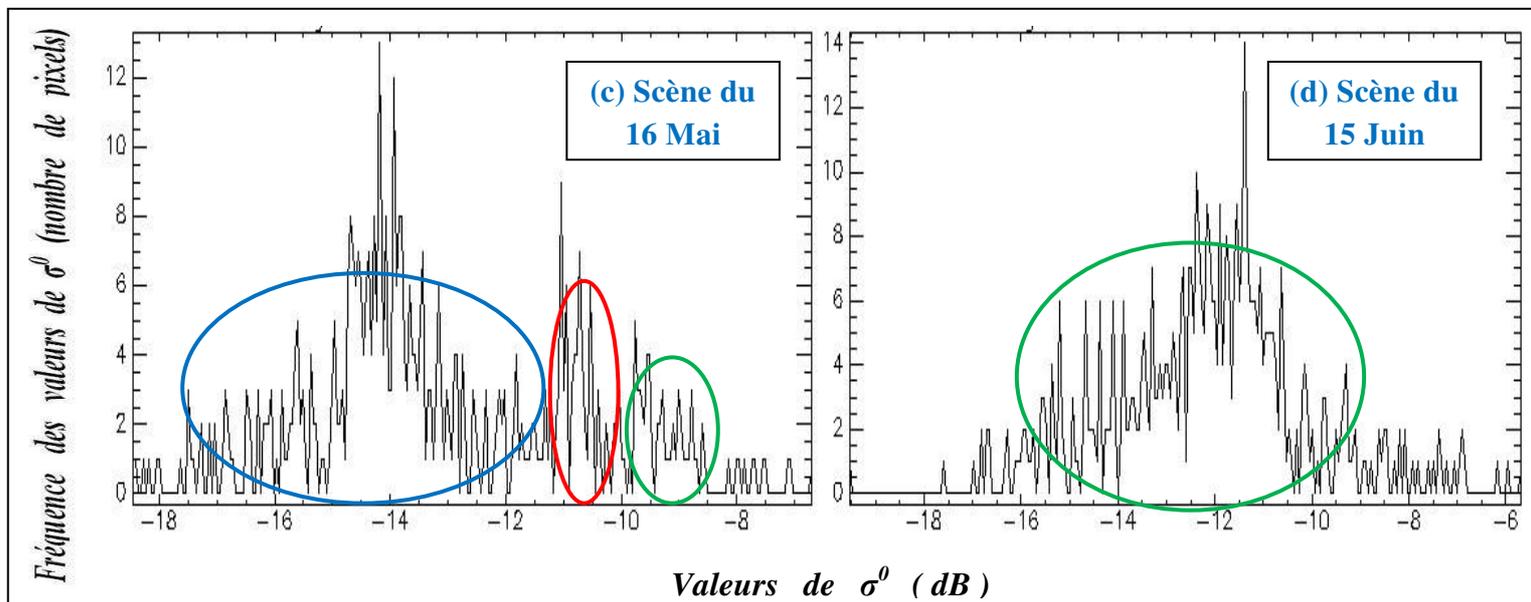


Figure 43. Histogrammes de fréquence des valeurs de σ^0 dans le site 5 durant la période de suivi.

- Sur la scène du 15 juin, nous avons un seul pic qui regroupe tout les pixels. La portion d'image est moins contrastée que celle du 16 mai.

Le site 5 n'était pas irrigué en juin. Les facteurs affectant le signal radar sont l'humidité du sol, la rugosité de surface et la biomasse végétale. La gamme des valeurs d'humidité est plus réduite que celle du mois de mai (5,6% à 9,7%). La biomasse végétale est un peu plus importante en juin. L'effet de la rugosité sur le coefficient de rétrodiffusion est le même pour les deux scènes. L'histogramme du mois de juin présente un seule pic car les trois facteurs affectant le signal radar varient dans des gammes plutôt réduite.

1.4. Conclusion

Les résultats obtenus peuvent se résumer comme suit :

** les paramètres climatiques*

Les scènes du 17 mars et du 16 avril ont été acquises pendant la saison humide alors que les scènes du 16 mai et du 15 juin ont été acquises pendant la saison sèche.

** la rugosité de surface*

L'évolution temporelle de la rugosité de surface dans le site 1 est très importante, surtout entre les scènes du mois d'avril et celle du mois de mai. L'effet des pluies intenses était plus marqué car le sol était nu durant la période de suivi. Par conséquent, l'utilisation de l'approche de détection des changements sera désormais sans intérêt sur la portion d'image du site 1.

L'évolution temporelle de la rugosité de surface dans les sites 2, 3, 4 et 5 est plutôt très faible car le sol était couvert et peu exposé à l'action des pluies. Nous avons utilisé l'approche de détection des changements sur les portions d'image des sites 2 et 3 afin de corriger l'effet de la rugosité et du couvert végétal dans ces parcelles cultivées. Dans les sites irrigués 4 et 5, l'approche de détection des changements n'a pas pu être utilisée car nous n'avons pas de scène de référence représentant l'état sec du sol.

** l'humidité du sol*

Dans les sites 1, l'humidité du sol baisse légèrement entre le mois de mars et le mois d'avril. Ensuite, elle chute vers des faibles valeurs en mai et baisse encore un peu en juin.

Dans les sites 2 et 3, l'humidité du sol baisse légèrement entre le mois de mars et le mois d'avril. Ensuite, elle chute vers des faibles valeurs en mai puis elle augmente un peu en juin. La scène du 16 mai a été prise comme référence représentant la saison sèche lors de l'utilisation de l'approche de détection des changements.

Dans le site 4, nous avons une large gamme des valeurs d'humidité en mai et en juin car le sol était irrigué jusqu'au mois de juin.

Dans le site 5, nous avons une large gamme des valeurs d'humidité en mai car le sol était irrigué. Ensuite, l'humidité a baissé considérablement et l'intervalle de variation était plutôt réduit lors de l'acquisition de l'image du 15 juin car le sol n'a pas été irrigué depuis plus de 3 semaines.

** le coefficient de rétrodiffusion*

La taille de la fenêtre du filtre de chatoiement affecte la résolution spatiale et radiométrique. Nous avons opté pour la plus petite taille, soit 5*5pixels, afin de minimiser le lissage sur les images et de conserver une bonne résolution spatiale pour la cartographie de l'humidité de surface.

L'analyse des histogrammes de fréquence nous permet de déterminer à chaque fois le facteur dominant qui affecte le signal radar. La dynamique du coefficient de rétrodiffusion dans le site 1 est contrôlée par l'évolution temporelle de l'humidité du sol et de la rugosité de surface. Dans les sites 2 et 3, c'est les changements de l'humidité du sol et l'évolution de la biomasse végétale qui contrôlent la dynamique du coefficient de rétrodiffusion. Enfin dans les sites 4 et 5, un aspect particulier des histogrammes de fréquences qui montrent plusieurs groupes de pixels est justifié par la pratique d'irrigation qui a donné un gradient des valeurs d'humidité de surface.

2. Estimation de l'humidité du sol en surface à partir des données Envisat-ASAR

Par le biais des régressions linéaires, nous avons étudié la relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l'humidité volumique du sol en surface. Dans un premier temps, nous avons étudié chaque site à part durant la période de suivi. Ensuite, les corrélations jugées significatives et représentatives à la fois ont été utilisées pour générer des modèles d'inversion spécifiques qui tiennent compte de la rugosité de surface et de la biomasse végétale dans chaque site.

2.1. Etude statistique du comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité volumique du sol en surface

2.1.1. Cas d'un sol nu (site 1)

L'étude des régressions linéaires nous a donné des corrélations statistiquement significatives dont les coefficients sont portés sur le tableau 17. Les valeurs de "r" sont 0.72, 0.75 et 0.62 pour les scènes du mois de mars, avril et mai respectivement. L'effet de l'humidité du sol a dominé celui de la rugosité de surface sur ces trois scènes. Par ailleurs, on observe que l'utilisation de l'approche de détection des changements n'apporte aucune amélioration. La seule corrélation significative est obtenue par différence entre la scène du mois de mars et celle du mois de mai (r est égal à 0.58). Ceci confirme l'importance de la variation de la rugosité de surface entre la saison humide et la saison sèche. Aussi, la possibilité d'utilisation de l'approche de détection des changements pour corriger les valeurs de σ^0 est exclue.

Tableau 17. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$.

r	θ% Mars	θ% Avril	θ% Mai	θ% Juin	Approche détection des changements			
					Mars-Mai	Avril-Mai	Mars-Juin	Avril-Juin
σ^0	0,719**	0,748***	0,618**	0,055	0,582*	0,445	0,253	0,241
	0,686***							

* Significative (0,05) ** Hautement significative (0,01) *** Très hautement significative (0,001)

Nous avons obtenu une corrélation meilleure et plus représentative en regroupant les échantillons du mois de mars et du mois d'avril. Il est à noter que ces deux scènes ont été acquises en saison humide et que la variation de la rugosité de surface entre ces deux scènes est faible.

Les régressions linéaires retenues sont donc celles regroupant le mois de mars et avril et celle du mois de mai. Sur la figure suivante, nous retrouvons leurs représentations graphiques respectives.

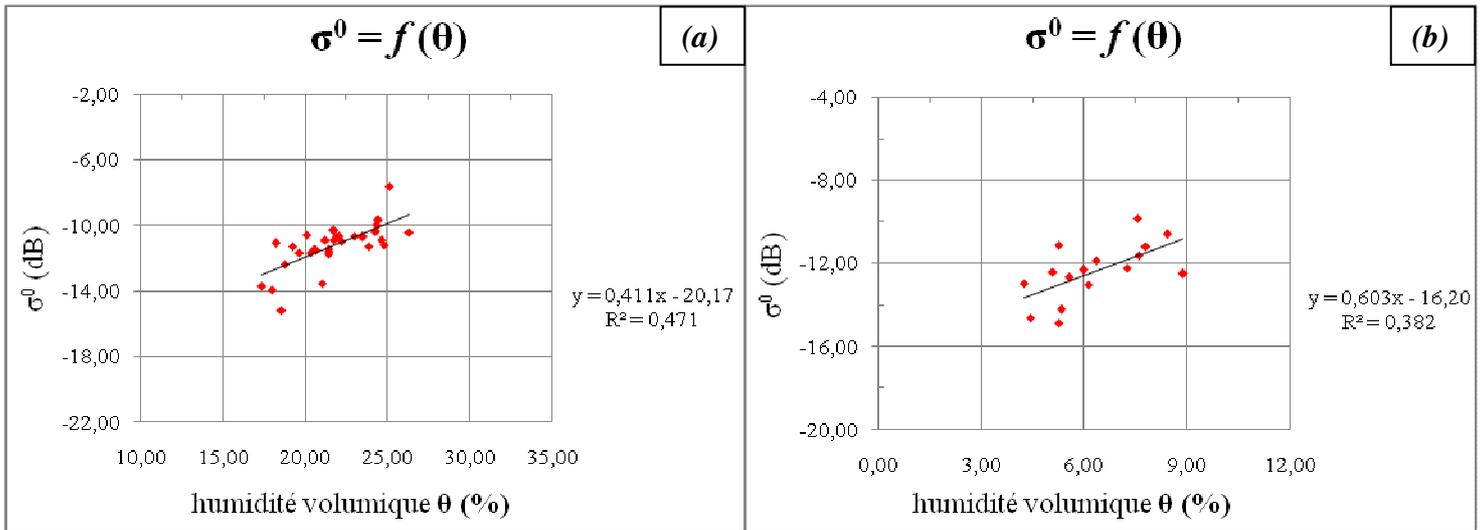


Figure 44. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité volumique du sol en surface et régression linéaire. (a) les échantillons du mois de mars et avril, (b) les échantillons du mois de mai.

L'équation de la droite de tendance est de la forme « $\sigma^0 = a*\theta + b$ ». Les constantes "a" et "b" ont changé légèrement entre les deux graphes. Ces changements sont dus au fait que ces deux constantes tiennent compte de la différence assez importante de la rugosité de surface entre la saison humide et la saison sèche.

Les corrélations du graphe (a) et (b) sont respectivement très hautement significatives et hautement significatives. Cependant, le nuage de points dans les deux cas n'est pas très bien aligné selon la droite de tendance.

2.1.2. Cas d'une parcelle agricole cultivée en intensif (site 2 et 3)

a) Site 2

L'analyse statistique révèle une seule corrélation significative pour la scène du mois de mars (tableau 18). Lors de l'acquisition de cette scène, la végétation ne dépassait pas 20cm de hauteur et l'humidité assez importante du sol était le facteur dominant affectant le coefficient de rétrodiffusion radar. Par ailleurs, les corrélations non significatives pour les scènes des mois d'avril, de mai et de juin sont justifiées par le fait que la biomasse végétale et la rugosité de surface affectent le signal radar plus que l'humidité du sol.

L'utilisation de l'approche de détection des changements a permis d'améliorer considérablement la relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l'humidité volumique du sol en surface. D'une part, parce que la variation de la rugosité de surface entre la saison humide et la saison sèche est quasi nulle car le sol était bien couvert pendant la période de suivi ; et d'autre part, car les scènes ont été acquises avec la même emprise. Ainsi, les images du mois de mars et avril ont été corrigées pixel par pixel vis-à-vis l'effet de la rugosité de surface et du couvert végétal. Deux corrélations hautement significatives ont été donc obtenues pour le mois de mars et avril en prenant la scène du mois de mai comme référence de l'état sec (r est égal à 0.86 et 0.77 respectivement). La possibilité d'utilisation de la scène du mois de juin comme référence de l'état sec a été prise en considération mais sans résultats intéressants (tableau 17).

Tableau 18. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$ dans le site 2.

r	θ % Mars	θ % Avril	θ % Mai	θ % Juin	Approche détection des changements			
					Mars-Mai	Avril-Mai	Mars-Juin	Avril-Juin
σ^0	0,670*	0,479	0,422	0,558	0,863**	0,766**	0,630*	0,167
					0,765***			

* Significative (0,05) ** Hautement significative (0,01) *** Très hautement significative (0,001)

Nous avons obtenu une corrélation meilleure et plus représentative en regroupant les échantillons du mois de mars et du mois d'avril tout en utilisant l'approche de détection des changements ($r = 0,77$). Ceci est dû au fait que les deux scènes ont été acquises en saison humide et que la variation de la rugosité de surface et de la biomasse végétale entre mars et avril était relativement faible.

Nous avons donc retenue l'approche de détection des changements et la régression linéaire regroupant les échantillons du mois de mars et avril. Sur la figure 45, nous retrouvons sa représentation graphique et l'équation de la droite de tendance.

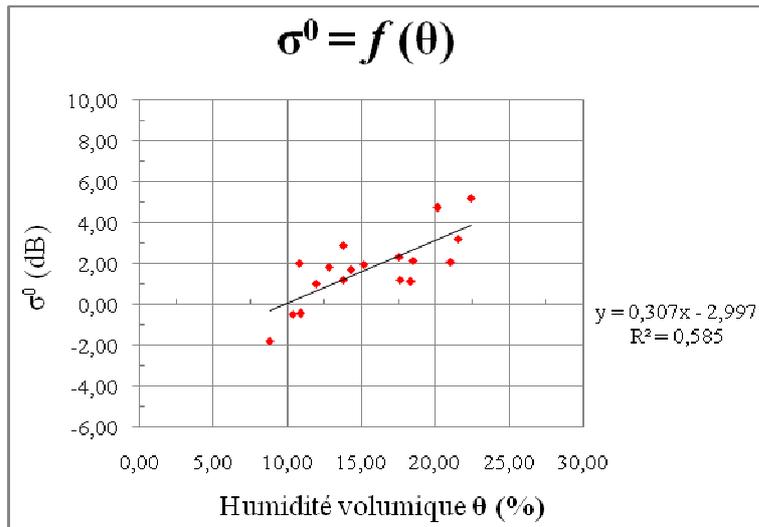


Figure 45. Variation du coefficient de rétrodiffusion normalisé (humide-sec) en fonction de l’humidité volumique du sol en surface et régression linéaire.

La corrélation de la figure 45 est très hautement significative. Le nuage de points est assez bien aligné selon la droite de tendance car l’humidité du sol est le principal facteur qui affecte le signal radar.

b) Site 3

Nous avons obtenu deux corrélations significatives pour le mois de mars et le mois d’avril (tableau 19). Lors de l’acquisition des deux scènes, la végétation ne dépassait pas 20cm de hauteur et l’humidité assez importante du sol était le facteur dominant affectant le coefficient de rétrodiffusion radar. Par ailleurs, les corrélations non significatives pour les scènes des mois de mai et de juin sont justifiées par le fait que la biomasse végétale et la rugosité de surface affectent le signal radar plus que l’humidité du sol.

L’utilisation de l’approche de détection des changements a permis d’améliorer la relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l’humidité volumique du sol en surface. Comme dans le site 2, la variation de la rugosité de surface entre la saison humide et la saison sèche était quasi nulle car le sol était plus ou moins couvert pendant la période de suivi. Les images du mois de mars et avril ont été corrigées pixel par pixel vis-à-vis l’effet de la rugosité de surface et du couvert végétal. Deux corrélations hautement significatives ont été donc obtenues pour le mois de mars et avril en prenant la scène du mois de mai comme référence de l’état sec (r est égal à 0.68 et 0.66 respectivement). L’utilisation de la scène du mois de juin comme référence de l’état sec ne donne pas de résultats intéressants (tableau 19).

Tableau 19. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$ Dans le site 3.

r	θ% Mars	θ% Avril	θ% Mai	θ% Juin	Approche détection des changements			
					Mars-Mai	Avril-Mai	Mars-Juin	Avril-Juin
σ ⁰	0,596*	0,647**	0,339	0,247	0,680**	0,664**	0,261	0,550*
					0,810***			

* Significative (0,05) ** Hautement significative (0,01) *** Très hautement significative (0,001)

Nous avons également obtenu une corrélation meilleure et plus représentative en regroupant les échantillons du mois de mars et du mois d’avril tout en utilisant l’approche de détection des changements ($r = 0,81$). Ceci est dû au fait que les deux scènes ont été acquises en saison humide et que la variation de la rugosité de surface et de la biomasse végétale entre mars et avril était relativement faible.

Finalement, nous avons retenu l’approche de détection des changements et la régression linéaire regroupant les échantillons du mois de mars et avril. Sur la figure 46, nous retrouvons sa représentation graphique et l’équation de la droite de tendance.

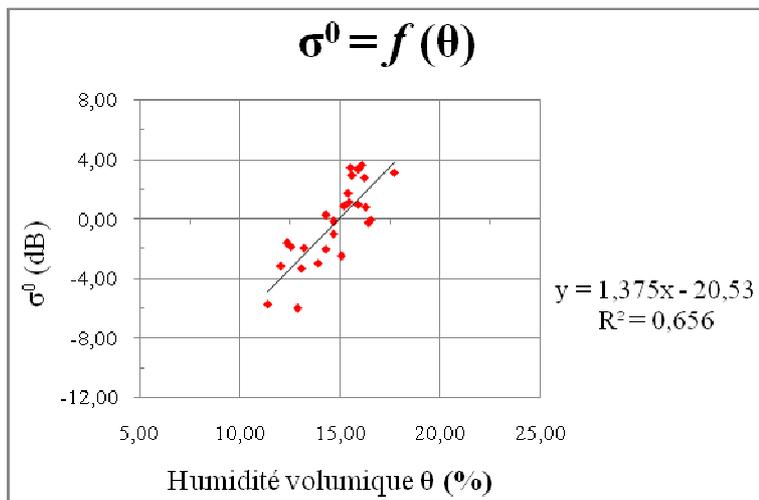


Figure 46. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l’humidité volumique du sol en surface et régression linéaire.

La corrélation représentée sur la figure 46 est très hautement significative. Le nuage de points est assez bien aligné selon la droite de tendance car l’humidité du sol est le principal facteur qui affecte le signal radar. Enfin, les coefficients "a" et "b" de l’équation de la droite de tendance sont spécifiques aux échantillons prélevés dans le site 3.

2.1.3. Cas d'une parcelle agricole cultivée en intensif et irriguée (site 4 et 5)

L'étude statistique des échantillons du site 4 nous a révélé deux corrélations significatives pour le mois de mai et le mois de juin. Les valeurs de "r" sont 0,63 et 0,78 respectivement. Par ailleurs, une corrélation significative est obtenue pour les échantillons du site 5 au mois de mai ($r = 0,72$). Dans les sites 4 et 5 et durant la période d'irrigation, l'effet de l'humidité du sol a dominé celui de la rugosité de surface et de la biomasse végétale. Aussi, la gamme de variation des valeurs de θ était plus large par rapport aux sites non irrigués.

Il est à noter que l'utilisation de l'approche de détection des changements pour les sites 4 et 5 n'est pas possible car nous n'avons pas de scène représentant l'état sec du sol.

Tableau 20. Coefficient de corrélation « r » pour la relation : $\sigma^0 = f(\theta)$.

	Site 4		Site 5
R	θ% Mai	θ% Juin	θ% Mai
σ^0	0,626**	0,779***	0,723**
	0,785***		

* Significative (0,05) ** Hautement significative (0,01) *** Très hautement significative (0,001)

En regroupant les échantillons des sites 4 et 5 pendant la période d'irrigation, nous avons obtenu une meilleure corrélation et plus représentative que les corrélations obtenues séparément (tableau 20). Parce que d'une part les deux parcelles se ressemblent du point de vue couvert végétal et pratique d'irrigation, et d'autre part, le nombre d'échantillons plus important nous permet de mieux calibrer les coefficients "a" et "b" de l'équation « $\sigma^0 = a*\theta + b$ ».

Sur la figure suivante, nous retrouvons la représentation graphique de la corrélation regroupant les échantillons des sites 4 et 5 pendant la période d'irrigation.

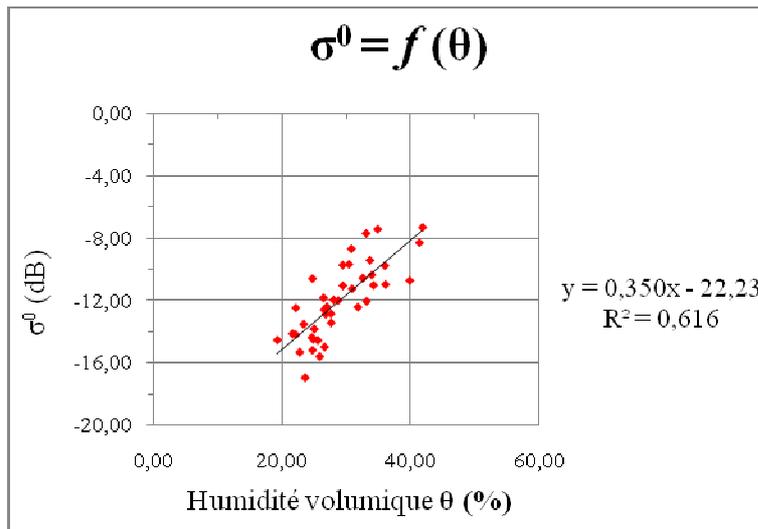


Figure 47. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l’humidité volumique du sol en surface et régression linéaire.

Le coefficient de corrélation "r" de 41 échantillons représentés sur la figure ci-dessus est égal à 0,79. Cette corrélation est très hautement significative. Aussi, l’alignement du nuage de point sur la représentation graphique est plutôt bon. Par conséquent, le processus d’inversion de l’humidité du sol devra donner une estimation assez proche de la réalité.

2.2. Estimation de l’humidité du sol en surface à partir du coefficient de rétrodiffusion

Après avoir étudié le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de l’humidité du sol en surface, nous allons maintenant procéder à l’inversion des valeurs de θ à partir des valeurs de σ^0 . Pour cela, nous avons créé des modèles d’inversion spécifiques à chaque site afin de tenir compte des conditions locales définies précédemment (rugosité de surface et biomasse végétale).

Les estimations de l’humidité du sol en surface ont été obtenue par inversion de la relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l’humidité volumique. Ensuite, la performance de l’inversion des valeurs de " θ " a été évaluée pour prouver la robustesse de l’approche utilisée. Pour cela, les mesures de terrain de l’humidité du sol en surface ont été comparées aux valeurs estimées à partir du signal radar. Trois paramètres statistiques ont été calculés : l’erreur absolue moyenne (MAE), l’erreur relative absolue moyenne (MAPE) et l’erreur quadratique moyenne (RMSE).

- l'erreur absolue moyenne :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$$

- l'erreur relative absolue moyenne :

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - O_i|}{P_i}$$

- l'erreur quadratique moyenne :

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

Ou « P » représente la variable de terrain, « O » représente la variable estimée et N est le nombre d'échantillons. La MAE et la RMSE sont exprimées en pourcentage d'humidité alors que la MAPE est exprimée en pourcentage relatif à l'humidité de terrain. L'interprétation des ces critères d'erreur dépend de la qualité de prévision exigée. Dans le cas présent, une MAE et RMSE inférieures à 5% ou une MAPE inférieure à 10% semble satisfaisant a priori.

Tableau 21. Modèles d'inversions de l'humidité du sol en surface et étude statistique.

			<i>Modèle d'inversion</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	<i>RMSE</i>
<i>Site 1</i>	Mars & Avril	$\sigma^0 = f(\theta)$	$x = 1,147*y + 34,6$	1,33	6,17	1,64
	Mai	$\sigma^0 = f(\theta)$	$x = 0,634*y + 14,18$	0,86	14,09	1,09
<i>Site 2</i>	Mars & Avril	<i>Détection des changements</i> $\Delta \sigma^0 = f(\theta)$	$x = 1,905*y + 12,15$	2,10	6,98	2,65
<i>Site 3</i>	Mars & Avril	<i>Détection des changements</i> $\Delta \sigma^0 = f(\theta)$	$x = 0,433*y + 14,59$	0,95	5,59	1,30
<i>Site 4</i>	Mai Juin	$\sigma^0 = f(\theta)$	$x = 1,755*y + 50,17$	2,65	9,25	3,21
<i>Site 5</i>	Mai					

Les résultats du tableau 21 nous permettent de faire les observations suivantes :

- La comparaison entre l'humidité estimée à partir des données Envisat-ASAR, et l'humidité mesurée par la méthode gravimétrique prouve la pertinence de l'approche utilisée (MAE < 2,7% et RMSE < 3,3%).
- L'erreur absolue moyenne varie entre 0,86% et 2,65% et l'erreur quadratique moyenne varie entre 1,09% et 3,21%. Ces valeurs sont faibles et donc intéressantes pour la cartographie de l'humidité du sol.
- En saison humide, qu'il s'agit d'un sol nu ou d'une parcelle agricole, l'erreur relative absolue moyenne est de l'ordre de 6%. La MAPE nous donne une idée sur l'erreur relative. à l'humidité en saison humide et nous indique aussi la fiabilité de l'approche utilisée (MAPE < 10 %).
- En saison sèche, dans le cas d'un sol nu l'erreur relative absolue moyenne est égale à 14%. Cette valeur élevée est expliquée par la décroissance de l'humidité de terrain en saison sèche (θ varie entre 4 et 9%). Sinon, la cartographie de l'humidité du sol même en saison sèche donnera une bonne précision (MAE = 0,86% et RMSE = 1,09%).
- Dans le cas d'une parcelle agricole irriguée, nous remarquons que la MAPE, la MAE et la RMSE sont plus élevées par rapport au sol nu et aux parcelles agricoles non irriguées. Le fait d'avoir une gamme deux à trois fois plus large des valeurs d'humidité du sol a augmenté un peu l'erreur de prédiction.

2.3. Conclusion

L'analyse du comportement du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de l'humidité volumique du sol en surface nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

*** cas d'un sol nu :**

En saison humide, la corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l'humidité volumique du sol en surface est, statistiquement, très hautement significative. Ce résultat est le même obtenu par Baghdadi *et al.* (2007), et Moeremans *et Dautrebande* (2000). Aussi, plus le nombre d'échantillons est important et plus la représentativité du modèle d'inversion est meilleure. Les coefficients de l'équation de la droite de tendance sont ainsi mieux calibrés (Baghdadi *et al.*, 2007).

En saison sèche, une corrélation significative a été obtenue pour le mois de mai. Les coefficients de l'équation de la droite de tendance ont changé légèrement par rapport à ceux de la saison

humide car ils prennent en considération le changement de la rugosité de surface entre les deux saisons.

L'utilisation de l'approche de détection des changements n'a pas amélioré la corrélation obtenue car la rugosité de surface a changé considérablement entre la saison humide et la saison sèche.

La comparaison des valeurs mesurées aux valeurs estimées de l'humidité du sol en surface nous a permis de calculer la MAE et la RMSE. Ces deux paramètres statistiques nous indiquent une erreur inférieure à 2% d'humidité lors de l'utilisation des modèles d'inversion. Par ailleurs, l'erreur relative absolue moyenne était de l'ordre de 6% en saison humide et de l'ordre de 14% en saison sèche. Globalement, les deux modèles générés pour la saison humide et pour la saison sèche s'adaptent parfaitement pour la cartographie de l'humidité du sol dans le cas d'un sol nu.

**** cas d'une parcelle cultivée non irriguée***

La scène du mois de mai a été choisie pour représenter l'état sec. L'approche de détection des changements a été utilisée pour corriger à la fois l'effet de la rugosité de surface et de la biomasse végétale.

Une corrélation très hautement significative est obtenue entre le coefficient de rétrodiffusion radar normalisé et l'humidité volumique du sol en surface. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par Bryant *et al.* (2003), Zribi *et al.* (2011), Zribi *et al.* (2007) et Moran *et al.* (1998).

Le processus d'inversion de l'humidité du sol à partir des données Envisat-ASAR nous a donné de très bons résultats. L'erreur absolue moyenne et l'erreur quadratique moyenne ne dépassent pas 3% alors que l'erreur relative absolue moyenne était de l'ordre de 6%.

**** cas d'une parcelle cultivée et irriguée***

L'approche de détection des changements n'a pas pu être utilisée car nous n'avons pas de scène de référence de l'état sec du sol. Cependant, nous avons obtenu une corrélation très hautement significative lors de la période d'irrigation. Malgré l'effet considérable de la rugosité de surface et de la biomasse végétal sur les images radar, nous avons obtenu des résultats satisfaisants car la gamme de variation des valeurs d'humidité était assez importante. Nous avons en effet enregistré un maximum de 42% d'humidité et un minimum de 19%.

L'inversion de l'humidité de surface a donné relativement de bons résultats. L'erreur absolue moyenne et l'erreur quadratique moyenne ne dépassent pas 4% alors que l'erreur relative absolue moyenne était de l'ordre de 9%. Ces valeurs sont acceptables pour la cartographie de l'humidité du sol à partir des images acquises.

3. Cartographie de l'humidité du sol en surface à partir des images RSO

Dans cette étape, nous avons utilisé les modèles d'inversion créés précédemment pour transformer les images RSO en cartes de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface. Ces modèles d'inversion, spécifiques à chaque site et durant une période donnée, ont été donc appliqués aux portions d'image correspondantes. Par la suite, nous avons utilisé la fonction de classification non supervisée du logiciel ENVI. Les classes d'humidité obtenues sont définies selon les statistiques locales de chacune des portions d'image. Elles diffèrent comme les valeurs de l'humidité du sol d'une carte à une autre.

Sur les figures 48, 49, 50, 51 et 52 nous retrouvons les cartes de distribution spatiales de l'humidité du sol en surface dans chacun des sites étudiés. Un fond topographique a été utilisé pour localiser avec exactitude les cinq parcelles tests.

Les résultats obtenus à partir de la classification se résument comme suit :

- *Site 1*

- sur la carte du mois de mars, les classes 1, 2, 3 et 4 correspondent aux intervalles des valeurs d'humidité suivants respectivement [15.5% - 18.8%], [18.8% - 21.8%], [21.8% - 23.4%] et [23.4% - 30.8%]. Plus de 50% des pixels de l'image appartiennent à la deuxième classe et environ 20% des pixels à la troisième classe. Les classes 1 et 4 regroupent chacune 14% des pixels. Ceci signifie que sur plus de 80% de la superficie du site 1, l'humidité de surface est comprise entre le point de flétrissement permanent et la capacité au champ.

- sur la carte du mois d'avril, les classes 1, 2, 3 et 4 correspondent aux intervalles des valeurs d'humidité suivants respectivement [17.1% - 19.2%], [19.2% - 21.1%], [21.1% - 23.1%] et [23.1% - 28.3%]. Environ 36% des pixels de l'image appartiennent à la troisième classe et 30% des pixels à la deuxième classe. Les classes 1 et 4 regroupent respectivement 20% et 14% des pixels de l'image. Donc, sur environ 70% de la superficie du premier site, l'humidité du sol est comprise entre le point de flétrissement permanent et la capacité au champ.

- sur la carte du mois de mai, les classes 1, 2 et 3 correspondent aux intervalles des valeurs d'humidité suivants respectivement [3.7% - 5.3%], [5.3% - 7.1%] et [7.1% - 9%]. Environ 60% des pixels de l'image appartiennent à la deuxième classe alors que la classe 1 et 3 regroupent chacune environ 20% des pixels. Il est à noter que les valeurs d'humidité sont toutes inférieures à l'humidité au point de flétrissement permanent.

A titre d'exemple, la comparaison de la carte de la saison humide (mars) et celle de la saison sèche (mai) nous permet d'identifier les zones de dessèchement rapide. Une telle information peut nous aider à détecter les hétérogénéités relatives à la perméabilité et donc à la structure et la texture au sein de la même parcelle (figure 48).

- *Site 2*

- sur la carte du mois de mars, les classes 1, 2, 3 et 4 correspondent aux intervalles des valeurs d'humidité suivants respectivement [16.9% - 24.2%], [24.2% - 27.7%], [27.7% - 30.3%] et [30.3% - 38.3%]. Les pixels affectés à la deuxième classe représentent environ 39% du total. La troisième classe regroupe 27% des pixels de l'image. La première classe regroupe 19% des pixels et enfin, la quatrième classe regroupe 15% des pixels de l'image. Ceci signifie que sur environ 19% de la superficie de la parcelle étudiée, l'humidité est inférieure au point de flétrissement permanent. Et sur près de 70% de la superficie de la parcelle, l'humidité est comprise entre le point de flétrissement permanent et la capacité au champ. Enfin sur environ 15% de la parcelle, l'humidité excède la capacité au champ mais n'atteint pas la saturation.

- sur la carte du mois d'avril, les classes 1, 2 et 3 correspondent aux intervalles des valeurs d'humidité suivants respectivement [23.5% - 25.8%], [25.8% - 27.8%] et [27.8% - 29.2%]. Plus de 55% des pixels de l'image sont affectés à la deuxième classe, 27% des pixels sont affectés à la troisième classe et 17 % des pixels à la première classe. Les valeurs de l'humidité sont donc toutes comprises entre le point de flétrissement permanent et la capacité au champ.

- *Site 3*

- sur la carte du mois de mars, les classes 1, 2 et 3 correspondent aux intervalles des valeurs d'humidité suivants respectivement [13.8% - 16.7%], [16.7% - 18.9%] et [18.9% - 22.4%]. Les pixels affectés à la deuxième classe représentent 71% du total. La première et la troisième classe regroupent chacune environ 15% des pixels de l'image. Donc, l'humidité ne dépasse pas la capacité au champ sur l'ensemble de la parcelle. Cependant, sur environ 20% de la superficie, l'humidité du sol ne dépasse pas le point de flétrissement permanent.

- sur la carte du mois d'avril, les classes 1, 2 et 3 correspondent aux intervalles des valeurs d'humidité suivants respectivement [10.6% - 16.3%], [16.3% - 18.3%] et [18.3% - 21.1%]. Environ 65% des pixels de l'image sont affectés à la deuxième classe, 20% des pixels sont affectés à la troisième classe et 16 % des pixels à la première classe. Les valeurs de l'humidité obtenues ne dépassent pas la capacité au champ. Mais sur plus de 80% de la superficie de la parcelle, l'humidité du sol est inférieure au point de flétrissement permanent.

- *Site 4*

- sur la carte du mois de mai, les classes 1 à 7 correspondent aux intervalles suivants des valeurs d'humidité respectivement [18.6% - 21.3%], [21.3% - 23.8%], [23.8% - 25.7%], [25.7% - 27.8%], [27.8% - 29.7%], [29.7% - 32.4%] et [32.4% - 37.7%]. Les classes 1 et 7 regroupent chacune moins de 10% des pixels de l'image alors que les classes 2 à 6 regroupent chacune entre 10 et 22% des pixels.

- sur la carte du mois de juin, les classes 1 à - correspondent aux intervalles suivants des valeurs d'humidité respectivement [20.4% - 24.4%], [24.4% - 26.3%], [26.3% - 28.4%], [28.4% - 30.4%], [30.4% - 32.4%] et [32.4% - 33.5%]. La classe 1 regroupe moins de 5% des pixels de l'image alors que les classes 2, 3 et 4 regroupent chacune environ 22% des pixels.

Sur les deux cartes obtenues pour le site 4, les estimations de l'humidité comportent des valeurs inférieures au point de flétrissement permanent jusqu'à des valeurs supérieures à la capacité au champ.

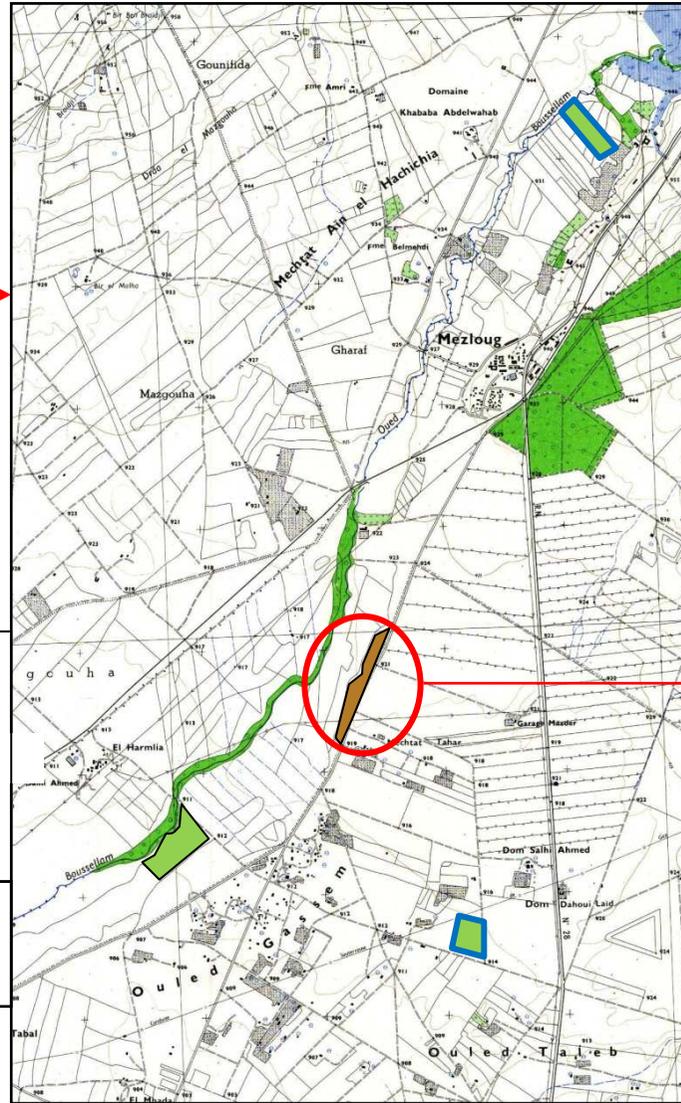
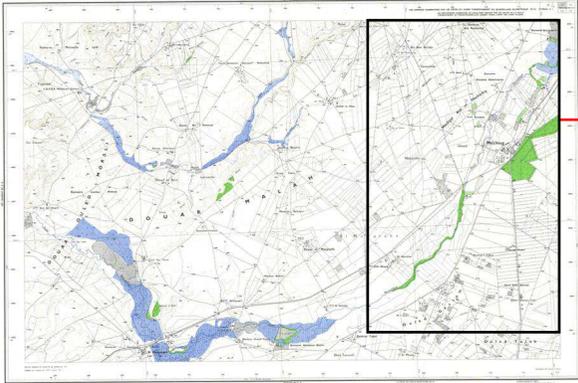
Sur la carte du mois de mai, nous pouvons clairement distinguer l'emplacement de la ligne d'irrigation (en rouge sur la figure 51). Aussi dans la partie Est de la parcelle, nous observons une hétérogénéité dans le dessèchement de la couche de surface du sol. La moitié Nord-est perd son humidité de surface plus rapidement que la moitié Sud-est (figure 51).

- *Site 5*

- sur la carte du mois de mai, les classes 1 à 6 correspondent aux intervalles suivants des valeurs d'humidité respectivement [15.7% - 18.2%], [18.2% - 22.4%], [22.4% - 24.5%], [24.5% - 27%], [27% - 30.1%] et [30.1% - 37.6%]. La classe 1 regroupe moins de 5% des pixels de l'image alors que les classes 2, 3 et 6 regroupent chacune 13 à 19% des pixels. Enfin, les classes 4 et 5 regroupent chacune environ 25% des pixels de l'image.

Comme pour le site 4, les estimations de l'humidité comportent des valeurs inférieures au point de flétrissement permanent jusqu'à des valeurs supérieures à la capacité au champ.

Carte topographique de Mezloug
(feuille 1-2)



-  Parcelle non cultivée (sol nu)
-  Parcelle cultivée sans irrigation
-  Parcelle cultivée en irrigué

1000 m

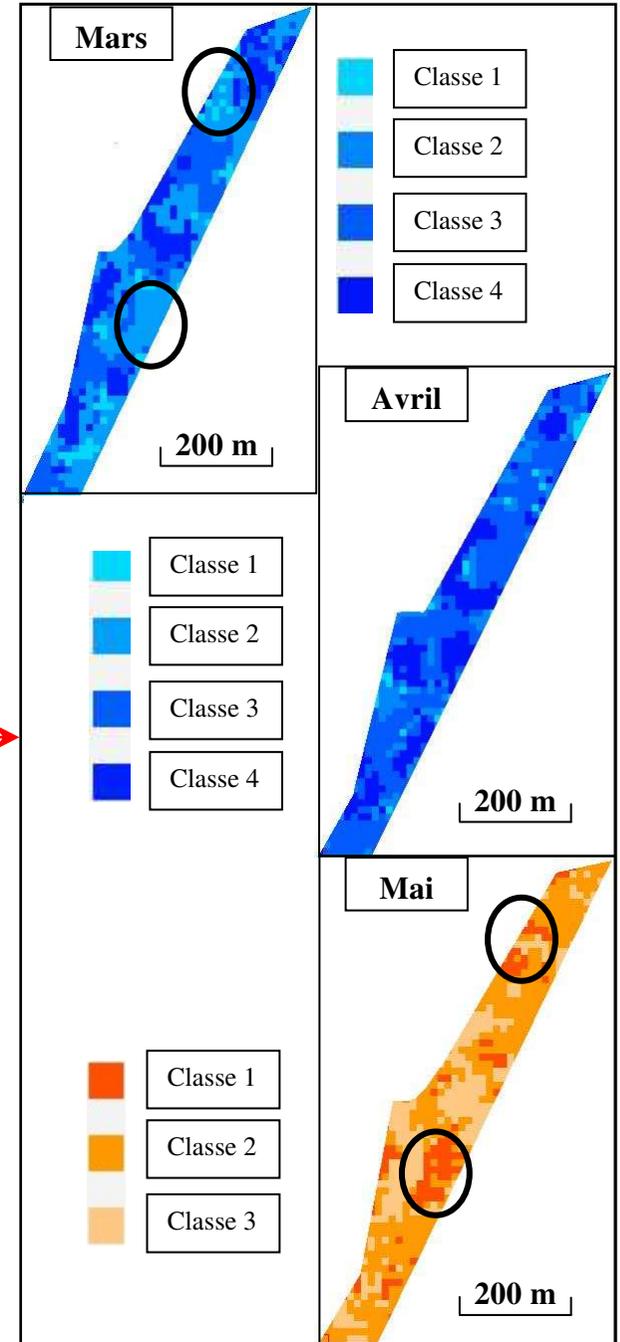
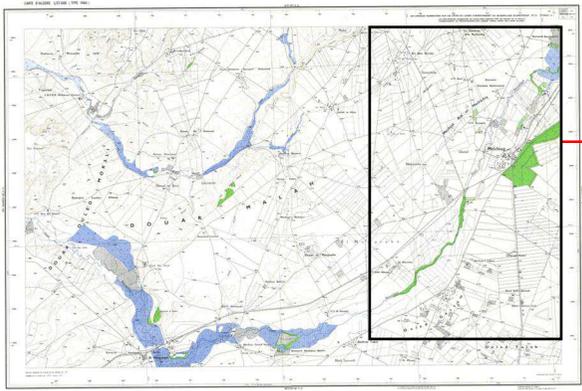


Figure 48. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 1.

Carte topographique de Mezloug
(feuille 1-2)



-  Parcelle non cultivée (sol nu)
-  Parcelle cultivée sans irrigation
-  Parcelle cultivée en irrigué

2000 m

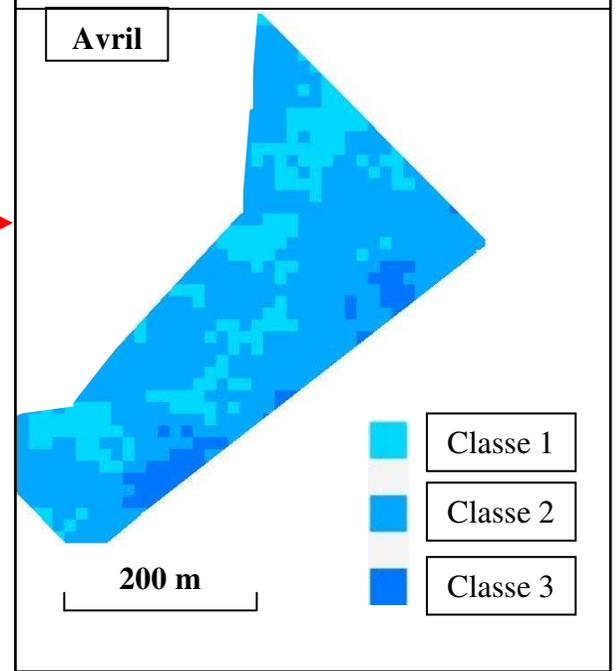
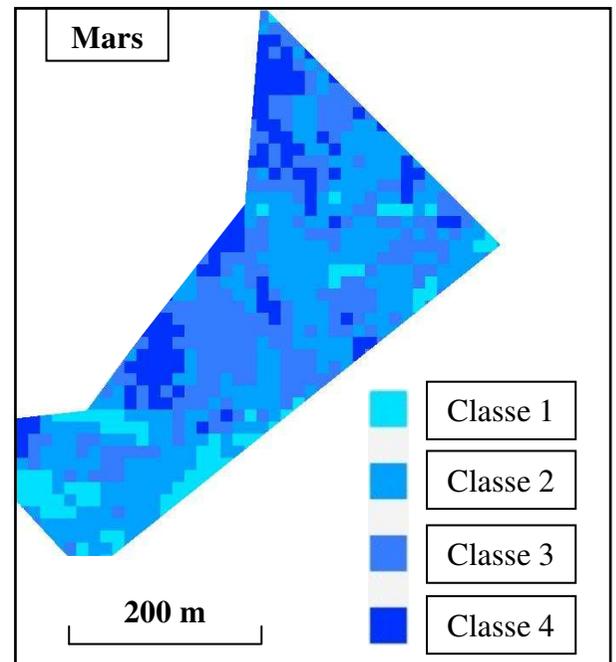
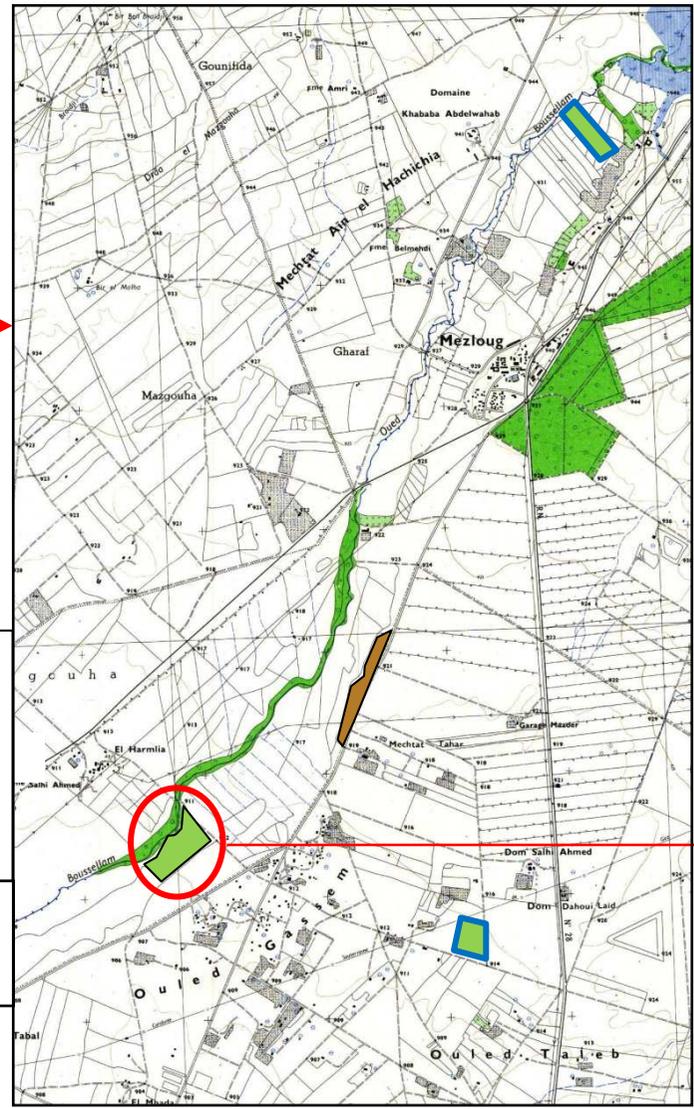


Figure 49. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 2.

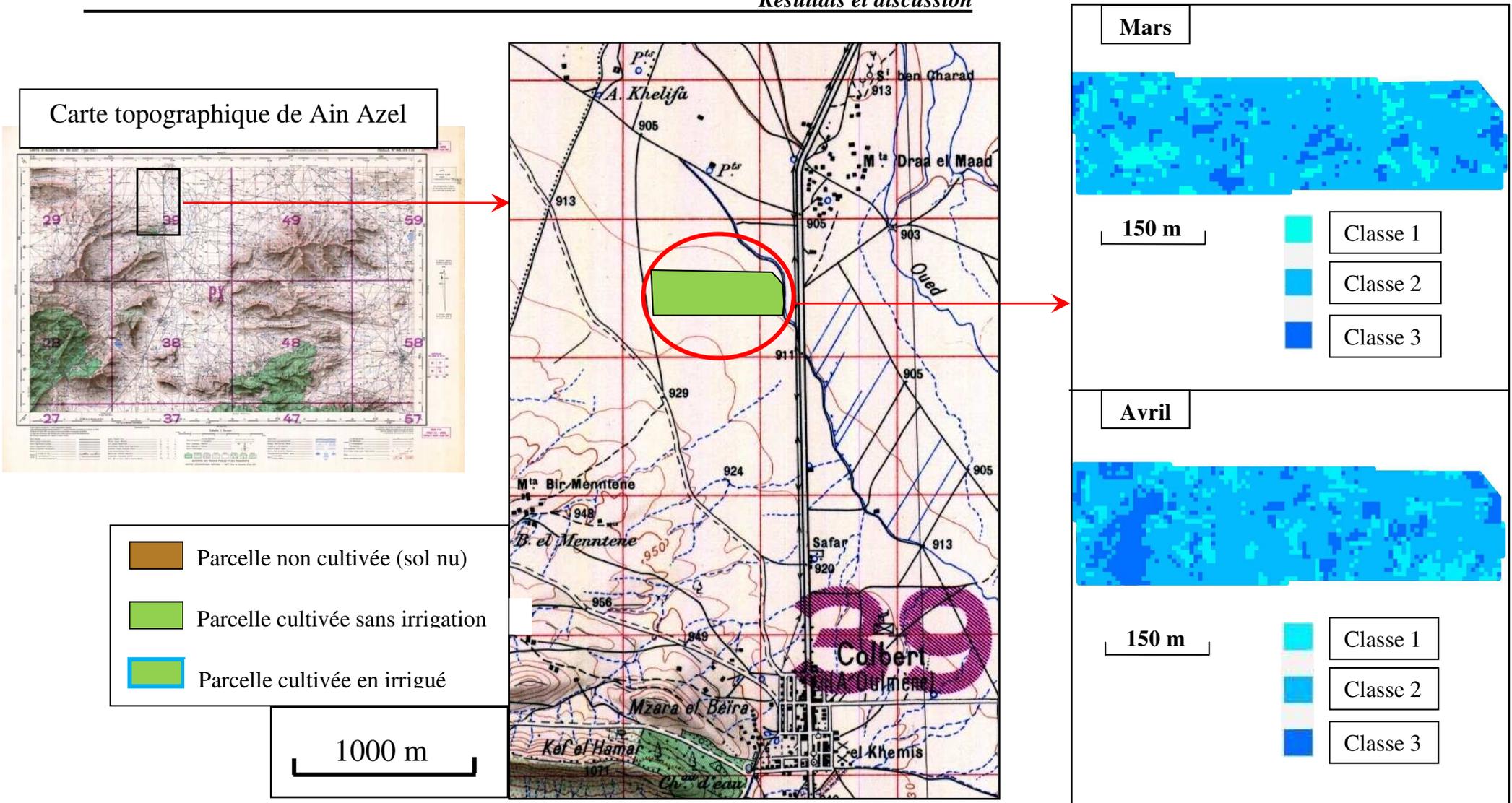


Figure 50. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 3.

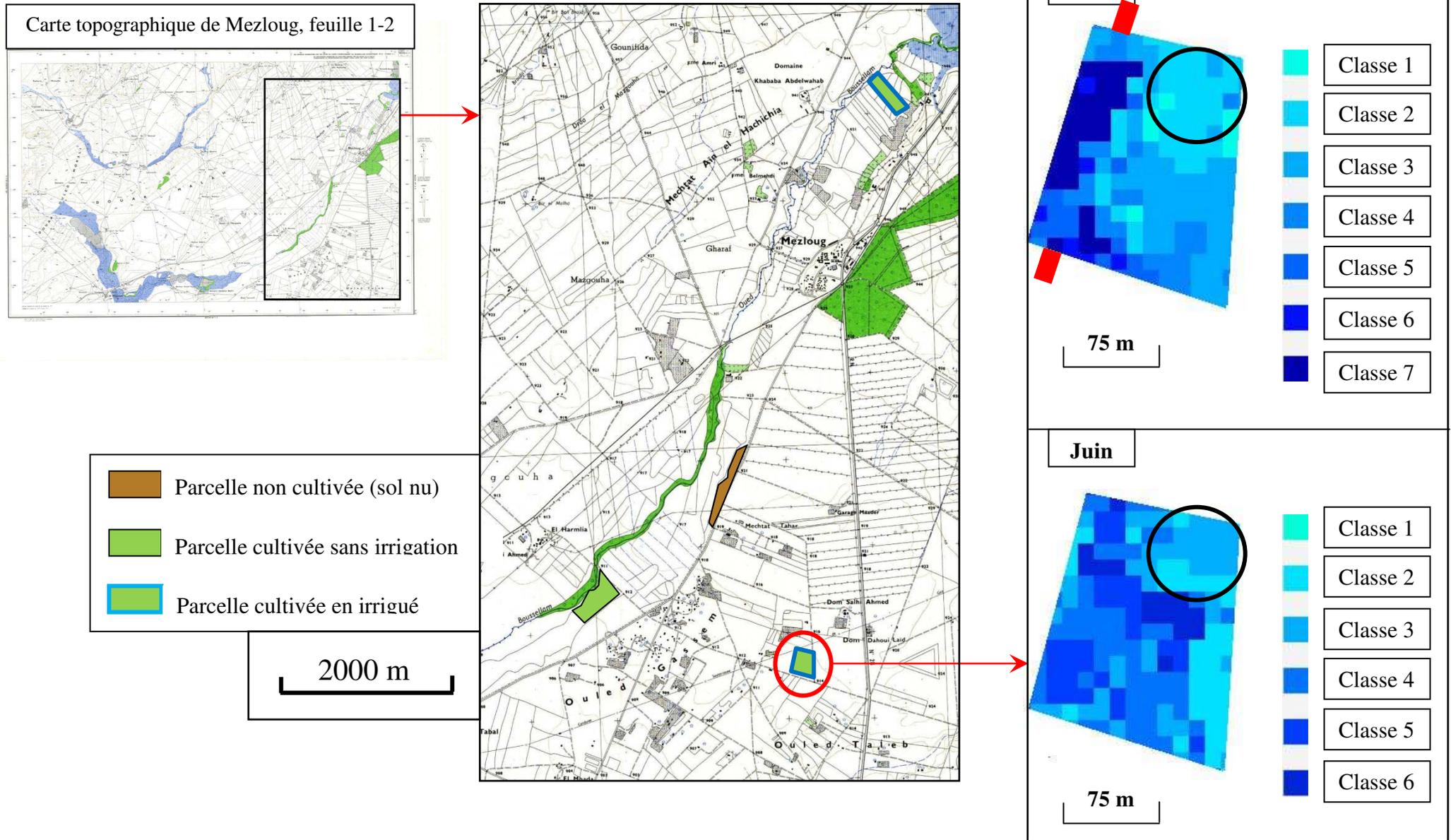


Figure 51. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 4.

Résultats et discussion

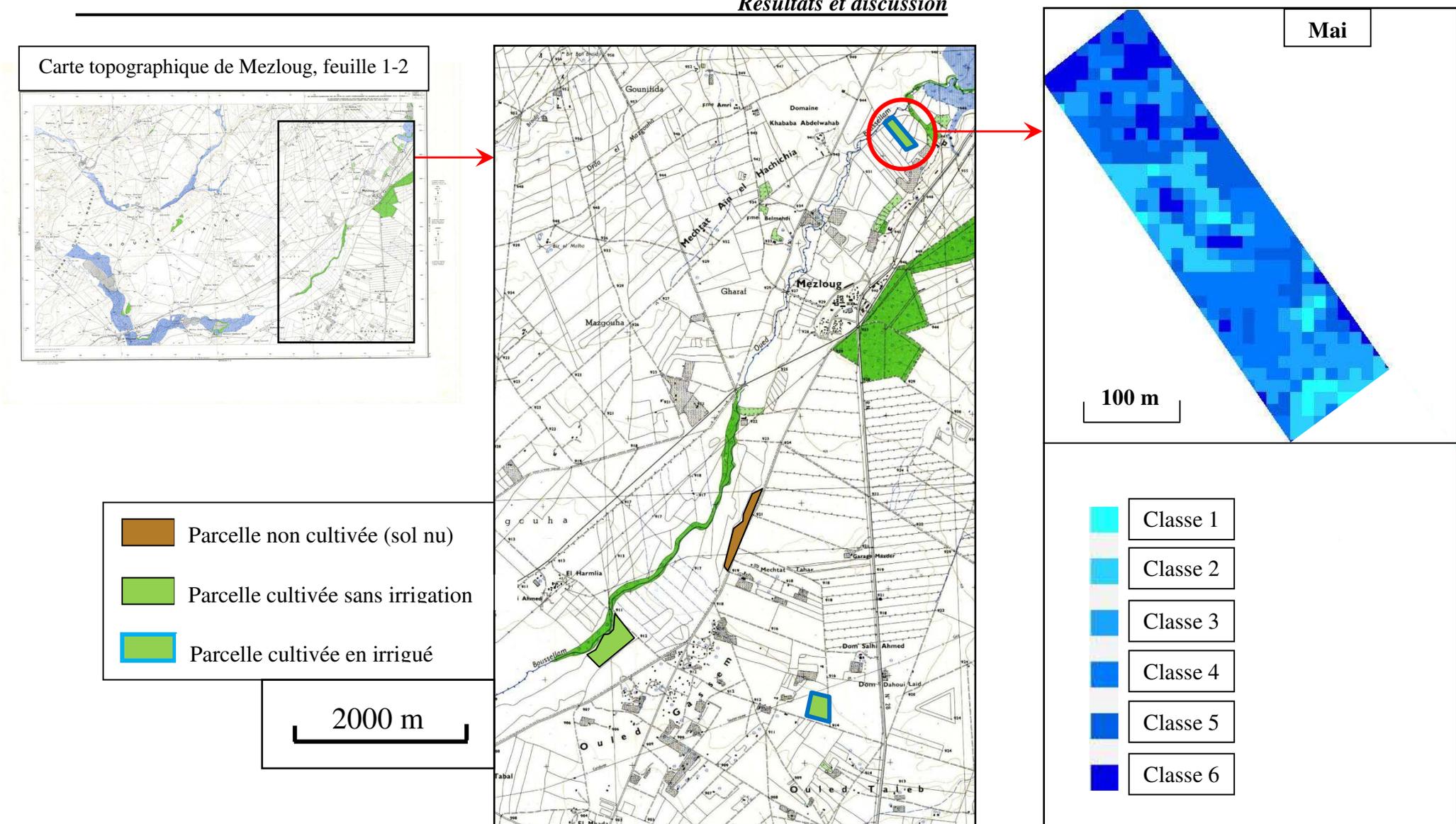


Figure 52. Carte de la distribution spatiale de l'humidité du sol en surface dans le site 5.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de thèse est de développer une approche relativement simple pour la cartographie de l'humidité du sol à partir des images radar en milieu semi aride. Les parcelles témoins ont été choisies pour le suivi de l'humidité, elles regroupent les principaux types de sol de la région et plusieurs types de couvert végétal. Le choix du satellite et du capteur était relatif à la configuration souhaitée mais également au rapport qualité/prix des produits offerts.

L'étude des données climatiques de la région montre l'alternance d'une saison sèche et une autre humide. Sur les quatre images utilisées, les deux premières ont été acquises pendant la saison humide et les deux dernières ont été acquises pendant la saison sèche. L'effet des pluies violentes était marqué sur le site où le sol était nu. La rugosité de surface a changé considérablement entre la saison humide et la saison sèche. Par conséquent, l'utilisation de l'approche de détection des changements pour la cartographie de l'humidité n'était pas possible.

Les prélèvements de terrain ont été faits pour la caractérisation des sols des parcelles tests et pour le suivi de l'humidité du sol en surface. Les valeurs moyennes de l'humidité dans chacune des parcelles étaient relatives à la capacité de rétention des sols. Cet effet était d'autant plus visible en saison humide qu'en saison sèche. Nous avons enregistré au mois de mars par exemple 22%, 34% et 19% respectivement dans un sol calcimagnésique nu, un sol argileux cultivé en blé dur d'hiver et dans un sol limoneux cultivé en blé dur de printemps.

L'analyse des données de télédétection nous a permis de tirer plusieurs conclusions.

- Premièrement, l'effet de lissage et de dégradation de la résolution spatiale par le filtre de chatoiement était d'autant plus marqué que la taille de la fenêtre mobile est importante. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé le filtre spécifique aux images Envisat du logiciel BEST de l'ESA. La taille de la fenêtre choisie était la plus petite, soit 5*5 pixels. L'effet du chatoiement était donc corrigé tout en conservant au maximum la radiométrie des images radar.
- Deuxièmement, l'analyse des histogrammes de fréquence nous a permis d'interpréter la distribution des valeurs radiométriques des pixels, et de les séparer en plusieurs classes. Chacune de ces classes nous indique un état d'humidité, de rugosité et du couvert végétal.
- Troisièmement, l'étude du comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité du sol en surface nous a donné des corrélations statistiquement significatives pour l'ensemble des parcelles tests. Dans le cas d'un sol cultivé sans irrigation, l'utilisation de l'approche de détection des changements améliore considérablement les résultats obtenus. Le coefficient de corrélation devient ainsi plus significatif. Par ailleurs, dans le cas d'un sol nu ou d'une parcelle cultivée en irrigué, l'approche de détection des changements n'a pas pu être

utilisée. Ceci est dû aux changements considérables de la rugosité de surface dans le premier cas, et à l'absence d'une scène représentant l'état sec dans le deuxième cas. Nous avons cependant obtenu des corrélations significatives, car l'effet de l'humidité du sol sur le coefficient de rétrodiffusion radar était plus marqué que celui de la rugosité de surface et du couvert végétal. Après avoir regroupé les échantillons prélevés dans des conditions identiques, toutes les corrélations obtenues sont devenues plus significatives et représentatives.

* Finalement, nous avons généré cinq modèles d'inversion de l'humidité du sol. Chacun de ces modèles est spécifique à une parcelle donnée ou à une période donnée. Le test de ces modèles d'inversion révèle une erreur absolue moyenne inférieure à 4%. Cette valeur est satisfaisante pour les besoins de la cartographie de l'humidité du sol et pour la gestion de ressources en eau dans une parcelle agricole.

L'approche utilisée dans ce travail pour la cartographie de l'humidité du sol est plutôt efficace. Elle peut être appliquée dans différents types de climat, sur plusieurs types de sol, et même en présence d'un couvert végétal intense de type herbacée. Les résultats obtenus sont satisfaisants, mais le domaine de validité des modèles d'inversion générés reste limité. La modélisation est donc tributaire du suivi de terrain.

La télédétection reste une technique relativement coûteuse. Néanmoins, les études ne cessent de démontrer son efficacité. Beaucoup de travaux de développement de la télédétection peuvent être justifiés de cette manière. Actuellement, certains produits de télédétection sont accessibles notamment ceux du satellite Envisat, ERS-2 et ALOS (moins de 0,1 Euro/km²). Mais il faut les valoriser avec la prospection de terrain et l'intégration dans une base de données spatiale.

Références
Bibliographiques

- Augeard B., 2006.** Mécanismes de genèse du ruissellement sur sol agricole drainé sensible à la battance : Etudes expérimentales et modélisation. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) Paris, 236p.
- Alshikaili T.Y., 2007.** Non-contact measurements of soil moisture content using thermal remote infrared sensors and weather variables. Thèse de Master of science, University of Saskatchewan, 118p.
- Baghdadi N., Aubert M., Cerdan O., Franchistéguy L., Viel C., Martin E., Zribi M., Desprats J.F., 2007.** Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: Application to the Touch Basin (France). *Sensors*, vol. 7, p.p. 2458-2483.
- Baghdadi N., Cerdan O., Zribi M., Auzet V., Darboux F., El Hajj M., Bou Kheir R., 2008.** Operational performance of current synthetic aperture radar sensors in mapping soil surface characteristics in agricultural environment: application to hydrological and erosion modeling. *Hydrol. Proc.*, vol. 22, pp. 9-20.
- Barbier C., 1996.** SAR Image Data Processing at CSL. Report No. TN-CSL-SAR-95001, CSL, Leige, Belgium, 52p.
- Baup F., 2007.** Apport des données Envisat/ASAR pour le suivi des surfaces continentales : application à la zone sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 202p.
- Bendahmane A., 2008.** Etude du niveau de dégradation structurale des sols des hautes plaines Sétifiennes. Mémoire d'ingénieur, Institut National Agronomique d'Alger, 62p.
- Benkaddour M., 2002.** Intégration des données radar et optiques dans un processus classificatoire. Mémoire de Magister, Centre National des Techniques Spatiales, 98p.
- BEST (2009) Envisat Sar Toolbox**, User Manual, Version 4.2.2. Disponible à l'adresse : <http://earth.esa.int/best/documentation>
- Blanchard A.J., Newton R.W., Tsang L., Jean R.B., 1982.** Volumetric effects in cross-polarized airborne radar data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, pp. 36-41.
- Bogonko M.N., 2005.** Hyperspectral remote sensing of soil moisture gradients in the Millingerwaard, The Netherlands. Thèse de Master of science. Vrije Universiteit Brussel-Belgium, 78p.
- Bonn F., Escadafal R., 1996.** La télédétection appliquée aux sols, in : Bonn F., Précis de télédétection, vol 2, Ed. AUPELF Québec, p.p. 12-136.
- Bouchetata T.B., 2006.** Analyse des agro-systèmes en zone tellienne et conception d'une base de données Mascara – Algérie. Thèse de Master of science, Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier. 168p.

Boulet G., Mougenot B., Ben Abdelouahab T., 2009. An evaporation test based on Thermal Infra Red remote-sensing to select appropriate soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, vol. 376, p.p. 589-598.

Bradley G.A., Ulaby F.T., 1981. Aircraft radar response to soil moisture. *Remote Sens. Environ.*, vol. 11, pp. 419-438.

Bryant R., Thoma D., Moran M.S., Holifield C., Goodrich D., Keefer T., Paige G., Williams D., Skirvin S., 2003. Evaluation of hyperspectral, infrared temperature and radar measurements for monitoring surface soil moisture. First Interagency Conference on Research in the Watersheds, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, p.p. 528-533.

Calvet R., 2003. Le sol : Propriétés et fonctions, Tome 2 : phénomènes physiques et chimiques Applications agronomiques et environnementales. Ed. France Agricole, 511 p.

Courault D., Seguin B., Oliosio A., 2003. Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data : some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models. ECIC Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions. 17p.

Centre Canadien de Télédétection, 2002. Ressources didactiques de télédétection radar. Programme GlobeSAR, Ressources naturelles Canada. Disponible à l'adresse : <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/limite-geographique/teledetection/radar-eloigne/2174>

Conseil National Economique et Social (CNES), Alger, 1999. Rapport sur la problématique de développement agricole en Algérie.

D'Urso G., Minacapilli M., 2006. A semi-empirical approach for surface soil water content estimation from radar data without a-priori information on surface roughness. *Journal of Hydrology*, vol. 321, p.p. 297-310.

Dobson M. C., Pierce L. Sarabandi K., Ulaby F.T., Sharik T., 1992. Preliminary analysis of ERS-1 SAR for forest ecosystem studies. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, vol. 30, p.p. 203–211.

Dobson M. C., Ulaby F., Hallikainen M., El-Rayes M., 1985. Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil- Part II : Dielectric Mixing Models. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, vol. 23, p.p. 35–47.

Duchaufour P., 1994. Abrégé pédologie : Sol, végétation, environnement. 4^{ème} édition. Ed. MASSON Paris, 324p.

El-Shikha D.M., Waller P., Hunsaker D., Clarke T., Barnes E., 2007. Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural water management*, vol. 92, p.p. 183-193.

Escorihuela M.J., 2006. Estimation de l'humidité du sol à partir de données radiométriques en bande-L : préparation de la mission SMOS. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 144p.

- Escorihuela M.J., Kerr Y., de Rosnay P., Wigneron J.P., Calvet J.C., Lemaître F., 2007.** A simple model for the bare soil microwave emission at L-band. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, vol. 45, n. 7, p.p. 1978-1987.
- European Space Agency (ESA), 2007.** Envisat ASAR product handbook, Issue 2.2, 564p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (F.A.O.), 2006.** Base de données *AQUASTAT*. Disponible sur : <http://www.fao.org/ag/aquastat>
- Friesen J.C., 2008.** Regional vegetation water effects on satellite soil moisture estimations for West Africa. *Ecology and Development Series*, n. 63, 124p.
- Frost V., Stiles J. & Holtzman J., 1982.** A model for RADAR images and its application to adaptative digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 4 (2), pp. 156-166.
- Hejmanowska B., Mularez S.C., 1996.** Thermal inertia modelling for soil moisture assessment based on remotely sensed data. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, vol. XXXI, part B7, pp. 281-286.
- Hirosawa H., Komiyama S., Matsuzaka Y., 1978.** Cross-polarized radar backscatter from moist soil. *Remote Sensing of Environment*, vol. 7, pp. 211-217.
- Holah N., Baghdadi N., Zribi M., Bruand A., King C., 2005.** Potential of ASAR/Envisat for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sens. Environ.*, vol 96, pp. 78-86.
- Hostache R., 2006.** Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) Paris, 242p.
- Idso S.B., Schmugge T.J., Jackson R.D., Reginato R.J., 1975.** The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of surface soil water status. *Journal of Geophysical Research*, vol. 80, p.p. 3044-3049.
- Jackson T.J., Schmugge J., Engman E.T., 1996.** Remote sensing applications to hydrology : soil moisture. *Hydrological Sciences*, vol. 41, p.p. 517-530.
- Jingfeng X., Jing L., Moody A., 2003.** A detail-preserving and flexible adaptive filter for speckle suppression in SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24 (12), pp. 2451-2465.
- Karatas B.S., Akkuzu E., Unal H.B., Asik S., Avci M., 2009.** Using satellite remote sensing to assess irrigation performance in Water User Associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. *Agricultural Water Management*, vol. 96, p.p. 982-990.
- Lahmar R., Batouche S., Labiod H., Meslem M., 1992a.** Les sols et leur répartition dans les Hautes Plaines Sétifiennes. Papier soumis à *Eaux & Sols d'Algérie*, revue de l'ANRH.

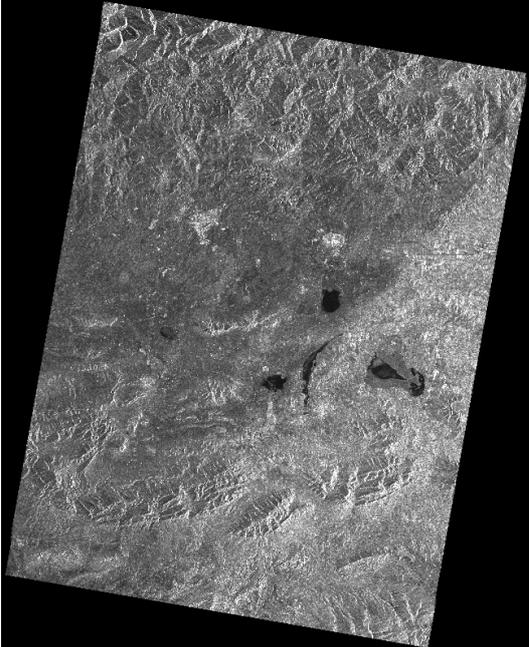
- Lambert R., 1996.** Géographie du cycle de l'eau. Ed. Presses universitaires du Mirail Toulouse, 431p.
- Le Bissonnais Y., 1988.** Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse Doctorat, Université d'Orléans, 196 p.
- Lee J., 1980.** Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.
- Lelong F., Roose E., Darthout R., Trevisan D., Boudjemline D., Boureghda S., Raheliarisoa M.A., 1993.** Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français : Expérimentation au champ sous pluies simulées. Science du sol, vol. 31, n. 4, p.p. 251-279.
- Li H., Zheng L., Lei Y., Li C., Liu Z., Zhang S., 2008.** Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. Agricultural water management, vol. 95, p.p. 1271-1278.
- Liebe J.R., van de Giesen N., Andreini M.S., Steenhuis T.S., Walter M.T., 2009.** Suitability and limitations of Envisat ASAR for monitoring small reservoirs in semiarid area. IEEE transactions on geosciences and remote sensing, vol. 47, n. 5, p.p. 1536-1547.
- Lopes A., Touzy R., Nezry E., 1990.** Adaptive speckle filters and scene heterogeneity, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 28 (6), pp. 992-1000.
- Lopes A., Nezry E., Touzy R., Laur H., 1993.** Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images, International Journal Of Remote Sensing, vol. 14 (9), pp. 535-544.
- Lu S., Ju Z., Ren T., Horton R., 2009.** A general approach to estimate soil water content from thermal inertia. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 149, p.p. 1693-1698.
- Marsily G., 2006.** Les eaux continentales. Rapport sur la Science et la Technologie n° 25. Académie des Sciences, Paris : EDP sciences. 328 p.
- Mattei E.A., 2006.** Material Type and Soil Moisture Determination Based on Radar Response. Thèse de Master of science. Université de Puerto Rico, 82p.
- Moeremans B., Dautrebande S., 2000.** Soil moisture evaluation by means of multi-temporal ERS SAR PRI images and interferometric coherence. Journal of Hydrology, vol. 234, p.p. 162-169.
- Monerris A., 2009.** Experimental estimation of soil emissivity and its applications to soil moisture retrieval in the SMOS mission. Thèse de PhD. Université polytechnique de Barcelone, 204p.
- Moran M.S., Peters-Lidard C.D., Watts J.M., McElroy S., 2004.** Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. Can. J. Remote Sensing, vol. 30, n. 5, p.p. 805-826.

- Moran M.S., Hymer D.C., Qi J., Marsett R.C., Helfert M.K., Sano E.E., 1998.** Soil moisture evaluation using radar and optical remote sensing in semiarid rangeland. American Meteorological Society, Special Symposium on Hydrology, Phoenix, Arizona, 7p.
- Mouffok C. E., 1997.** Diversité des systèmes d'élevage bovin laitier et performances animales en région semi aride de Setif. Thèse de Magister, Institut national agronomique INA Alger, Algérie. 148p.
- Nghiem S.V., 2005.** Satellite remote sensing of soil moisture for drought applications. 5p. Disponible sur l'adresse : http://www.drought.gov/imageserver/NIDIS/workshops/remote_sensing/abstracts/son_nghiem.pdf
- Njoku E.G., Entekhabi D., 1994.** Passive remote sensing of soil moisture. Journal of Hydrology, vol. 184, p.p. 101-129.
- Normand M., 1991.** Perspectives offertes par la télédétection radar dans le domaine de l'état hydrique des sols. In : Pouget Marcel (ed.). Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales. Paris : ORSTOM, 1991, pp. 191-205. Disponible sur l'adresse : <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:34615><http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:34615>.
- Ouamer-Ali A., 2007.** Etude de quelques propriétés des sols de la région de Sétif. Mémoire d'ingénieur, Institut National Agronomique d'Alger, 65p.
- Ramnath V.K., 2003.** Estimation of soil moisture using active microwave remote sensing. Thèse de Master of science. Université du Mississippi, 81p.
- Rosich B., Meadows P., 2004.** Absolute calibration of ASAR level 1 products generated with PF-ASAR, Edition 1, Revision 5. Ed. European Space Agency ESRIN. 26p.
- Sahebi M.R., Angles J., Bonn F., 2002.** A comparison of multi-polarization and multi-angular approaches for estimating bare soil surface roughness from spaceborn radar data. Canadian Journal of Remote Sens., vol. 28, n°5, pp. 641-652.
- Saleh K., Wigneron J.P., de Rosnay P., Calvet J.C., Escorihuela M. J., Kerr Y., Waldteufel P., 2006.** Impact of rain interception by vegetation and mulch on the L-band emission of natural grass. Remote sens. environ., vol. 101, p.p.127 – 139.
- Saoud M., 2009.** Etude de la conductivité hydraulique des sols de la région de Sétif. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA, ex : INA d'Alger), 46p.
- Schmugge T., 1985.** Remote sensing of soil moisture. in Encyclopedia of Hydrological Forecasting, Anderson M.G., Ed. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 101-124.
- Seguin B., Itier B., 1983.** Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. Int. J. Remote Sensing, vol. 4, n°2, pp. 371-383.
- Shi J., Wang J., Hsu A.Y., O'Neill P.E., Engman E.T., 1997.** Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness using L-band SAR image data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 35, pp. 1254-1266.

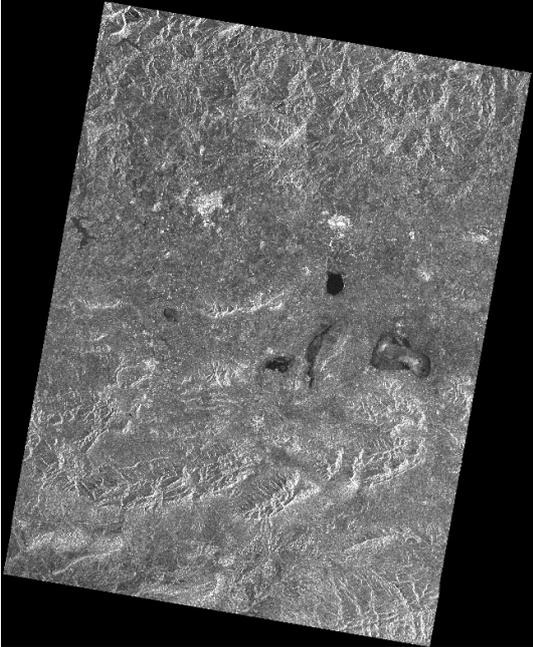
- Stengel P., Bruckler L., Balesdent J., 2009.** Le sol. Ed. Quae INRA, 183p.
- Thenkabail P.S., Smith R.B., De Pauw E., 2000.** Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. Remote Sensing of Environment, vol. 71, pp. 158-182.
- Ulaby F.T., Dobson M.C., 1989.** Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. Artech House Remote Sensing Library. 357p.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K., 1982.** Microwave remote sensing active and passive : vol.II : Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. Artech House (GBR). 608p.
- Ulaby F.T., Baltivala P.P., 1976.** Optimum radar parameters for mapping soil moisture. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol 14, pp. 81-93.
- Verstraeten W.W., Veroustraete F., van der Sande C.J., Grootaers I., Feyen J., 2006.** Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. Remote Sensing of Environment, vol. 101, issue 3, pp. 299-314.
- Vannier E., Taconet O., Dusséaux R., Chimi O., 2011.** Analyse et modélisation de la rugosité de surface. article disponible sur l'adresse : <http://www.latmos.ipsl.fr/index.php/fr/ester/themes-de-recherche/surfaces-et-sub-surfaces-continetales/2155-analyse-et-modelisation-de-la-rugosite-de-surface->
- Walker J.P., 1999.** Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data. Thèse de PhD, Université de Newcastle, New South Wales, Australie. 458p.
- Wang C., Qi J., Moran M.S., Marsett R., 2004.** Soil moisture estimation in a semiarid rangeland using ERS-2 and TM imagery. Remote Sensing of Environment, vol. 90, p.p. 178-189.
- Wanger W., Pathe C., Sabel D., Bartsch A., Kunzer C., Scipal K., 2007.** Experimental 1 km soil moisture products from Envisat ASAR for southern Africa. Envisat Symp., Montreux, Switzerland. 6p.
- Zribi M., Chahbi A., Shabou M., Lili-Chabaane Z., Duchemin B., Baghdadi N., Amri R., Chehbouni A., 2011.** Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using Envisat ASAR radar data for soil evaporation evaluation. Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 15, p.p. 345-358.

Annexes

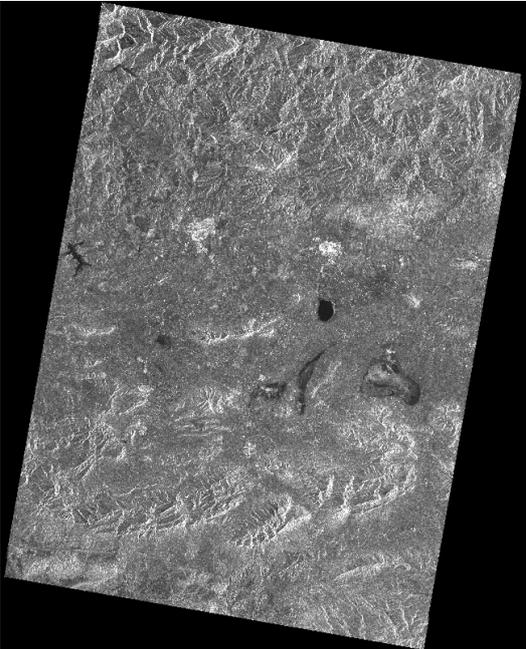
Annexe 1. Aperçu des quatre images satellites acquises. (a) images du 17 mars 2011, (b) image du 16 avril 2011, (c) image du 16 mai 2011, et (d) image du 15 juin 2011.



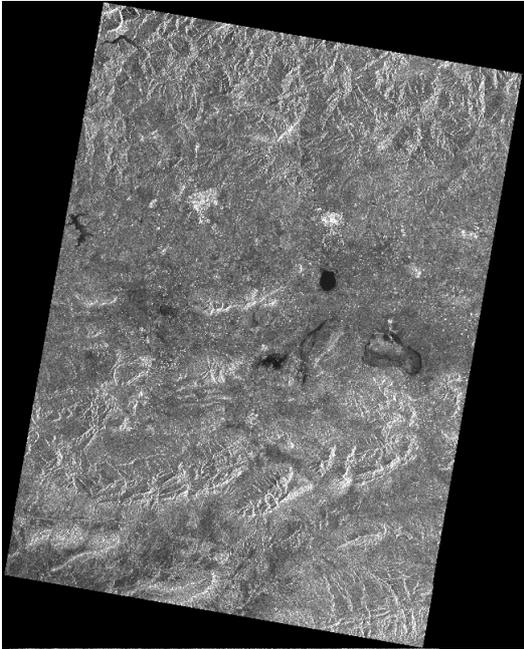
(a)



(b)



(c)



(d)

Annexe 2. Coordonnées géographiques des points de prélèvements dans les cinq sites suivis, résultats des mesures de l'humidité de surface et valeurs radiométriques des pixels de l'image correspondante (dB).

- Site 1, prise du mois de mars

	Latitude			Longitude			Altitude (m)	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	36	5	21,6	5	19	34,6	924	25,12	-7,64	-7,64	-8,10	-9,39	-8,70
2	36	5	22,2	5	19	33,3	920	23,86	-11,29	-11,29	-9,64	-11,13	-9,95
3	36	5	19,4	5	19	32,9	919	21,39	-11,76	-11,76	-11,52	-11,49	-13,49
4	36	5	21,2	5	19	32,7	922	21,74	-10,27	-10,27	-9,98	-9,54	-9,97
5	36	5	20,5	5	19	33,7	920	21,88	-10,69	-10,69	-10,47	-11,94	-12,02
6	36	5	19,9	5	19	31,4	919	19,65	-11,7	-11,70	-14,07	-13,75	-12,75
7	36	5	18,7	5	19	30,7	918	24,77	-11,24	-11,24	-10,95	-10,87	-11,06
8	36	5	18,1	5	19	31,9	917	24,64	-10,94	-10,94	-11,68	-11,65	-11,44
9	36	5	16,9	5	19	31,2	917	18,56	-15,17	-15,17	-14,02	-10,12	-11,18
10	36	5	17,5	5	19	29,5	916	24,35	-10	-10,00	-10,66	-10,72	-10,73
11	36	5	15,5	5	19	28,7	916	20,64	-11,5	-11,50	-11,19	-11,87	-11,94
12	36	5	16,4	5	19	28,7	917	22,99	-10,68	-10,68	-10,36	-10,16	-11,01
13	36	5	15,7	5	19	30,1	916	24,29	-10,4	-10,40	-11,17	-11,35	-10,58
14	36	5	14,6	5	19	29,5	917	21,22	-10,9	-10,90	-9,83	-10,25	-10,31
15	36	5	15,1	5	19	28,2	915	21,41	-11,64	-11,64	-13,27	-12,54	-12,09
16	36	5	13,9	5	19	27,3	916	21,04	-13,56	-13,56	-10,61	-11,42	-11,53

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 1, prise du mois d'avril

	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	18,23	-9,51	-11,09	-11,42	-9,88	-8,89
2	21,73	-10,16	-10,88	-10,42	-10,78	-10,93
3	17,39	-17,12	-13,68	-10,49	-10,81	-11,05
4	21,45	-12,16	-11,43	-13,00	-10,89	-10,15
5	21,63	-11,03	-10,27	-10,57	-10,80	-11,65
6	19,24	-7,58	-11,26	-8,97	-9,01	-9,46
7	23,50	-11,85	-10,71	-10,81	-11,99	-9,23
8	17,99	-11,62	-13,94	-13,06	-10,07	-10,96
9	22,23	-11,73	-10,97	-12,55	-12,43	-11,05
10	22,02	-10,00	-10,71	-10,50	-10,66	-10,60
11	20,60	-10,86	-11,45	-10,81	-10,28	-10,92
12	24,44	-9,84	-9,70	-10,22	-10,41	-9,58
13	26,32	-13,74	-10,43	-10,63	-10,72	-10,94
14	20,08	-9,85	-10,62	-11,32	-11,02	-9,81
15	20,34	-13,14	-11,70	-13,14	-12,64	-12,17
16	18,76	-9,57	-12,37	-11,43	-11,01	-9,23

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 1, prise du mois de mai

	0 %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	7,27	-12,26	-10,80	-12,27	-10,58	-9,90
2	6,36	-11,86	-14,57	-12,51	-12,19	-13,02
3	4,25	-13,00	-12,76	-11,38	-11,34	-11,52
4	5,27	-11,12	-10,97	-10,97	-13,03	-13,16
5	8,43	-10,61	-9,86	-10,12	-10,33	-10,63
6	5,32	-14,24	-14,78	-13,75	-14,20	-14,29
7	7,81	-11,18	-9,38	-11,64	-12,05	-11,34
8	7,60	-11,63	-11,37	-11,46	-11,14	-12,91
9	8,90	-12,51	-14,51	-12,71	-11,19	-11,35
10	5,98	-12,33	-11,44	-12,89	-11,04	-13,14
11	5,26	-14,89	-13,85	-14,69	-13,90	-12,76
12	7,55	-9,84	-10,56	-8,78	-8,96	-9,34
13	6,13	-13,02	-12,09	-13,72	-12,99	-12,54
14	4,43	-14,63	-13,52	-12,71	-12,75	-12,29
15	5,56	-12,70	-11,55	-13,14	-12,65	-12,25
16	5,10	-12,41	-8,98	-8,92	-11,99	-9,26

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 2, prise du mois de mars

	Latitude			Longitude			Altitude (m)	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	36	4	32,3	5	18	33,2	906	32,61	-16,31	-15,85	-12,27	-12,45	-14,50
2	36	4	31,7	5	18	28,1	908	35,10	-17,86	-15,38	-15,40	-15,20	-15,16
3	36	4	31,3	5	18	31,7	907	30,09	-15,62	-15,98	-13,10	-12,79	-12,55
4	36	4	33,3	5	18	32,0	906	34,36	-10,82	-13,94	-10,08	-12,89	-13,09
5	36	4	30,2	5	18	30,6	906	33,80	-14,71	-13,32	-13,58	-14,10	-13,97
6	36	4	31,0	5	18	29,5	907	34,84	-15,38	-13,62	-14,30	-14,25	-14,95
7	36	4	32,1	5	18	30,6	907	31,74	-13,60	-14,94	-13,17	-14,61	-14,49
8	36	4	33,0	5	18	29,6	907	32,21	-14,39	-14,76	-14,51	-14,56	-14,12
9	36	4	34,0	5	18	30,7	907	35,72	-14,04	-9,76	-13,46	-13,46	-13,29

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 2, prise du mois d'avril

	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	26,99	-12,83	-11,64	-14,47	-10,39	-10,40
2	26,47	-14,72	-15,87	-16,04	-15,52	-15,57
3	23,69	-13,14	-13,72	-12,90	-12,45	-12,55
4	26,81	-11,25	-13,05	-12,86	-11,56	-11,52
5	26,58	-14,09	-12,65	-12,53	-13,23	-12,49
6	27,57	-11,85	-12,82	-12,64	-12,97	-13,16
7	26,94	-11,85	-12,23	-12,62	-14,10	-11,81
8	24,09	-13,84	-15,53	-15,33	-14,77	-12,83
9	26,43	-12,70	-14,95	-12,69	-15,04	-14,82

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 3, prise du mois de mars

	Latitude			Longitude			Altitude (m)	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	35	56	43,3	5	18	40	913	18,56	-12,58	-11,88	-11,67	-12,68	-12,59
2	35	56	43,3	5	17	38,5	913	19,14	-11,29	-11,74	-11,80	-12,28	-12,63
3	35	56	43,4	5	17	37	912	18,26	-12,29	-11,89	-12,09	-12,30	-12,31
4	35	56	43,3	5	17	41,2	911	16,94	-12,75	-13,29	-13,09	-12,52	-13,93
5	35	56	43,4	5	17	35,3	913	17,89	-11,97	-12,24	-12,29	-12,26	-12,32
6	35	56	43,4	5	17	34	913	18,08	-12,75	-12,76	-12,86	-12,22	-12,37
7	35	56	43,1	5	17	42,5	911	20,37	-10,36	-11,79	-10,65	-13,94	-13,57
8	35	56	42,4	5	17	35,3	914	17,34	-13,94	-12,12	-12,22	-12,41	-12,35
9	35	56	42,5	5	17	33,9	914	17,31	-12,75	-13,20	-14,14	-14,21	-12,34
10	35	56	42,4	5	17	36,8	914	18,56	-12,12	-12,07	-12,01	-12,08	-12,24
11	35	56	42,3	5	17	39,5	914	19,29	-13,80	-12,46	-12,59	-12,73	-12,68
12	35	56	42,4	5	17	38,1	914	19,17	-10,76	-11,94	-12,00	-12,34	-12,60
13	35	56	42,4	5	17	40,9	914	17,83	-10,50	-13,29	-13,01	-12,96	-15,56
14	35	56	42,3	5	17	42,1	914	20,13	-11,36	-12,35	-14,01	-11,99	-11,93

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 3, prise du mois d'avril

	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	19,35	-16,99	-12,20	-13,75	-13,75	-13,67
2	17,84	-11,74	-10,78	-11,58	-11,53	-11,57
3	18,67	-13,01	-12,02	-14,17	-13,53	-12,77
4	16,32	-11,59	-13,19	-13,56	-12,44	-13,49
5	17,90	-9,46	-13,04	-13,67	-13,18	-11,88
6	15,90	-15,63	-16,28	-15,72	-15,38	-11,70
7	18,90	-10,87	-12,14	-10,89	-10,52	-9,88
8	16,14	-13,06	-15,70	-15,64	-15,18	-12,78
9	14,42	-16,00	-16,92	-15,88	-14,43	-14,09
10	15,65	-14,40	-12,69	-15,48	-15,55	-15,46
11	14,27	-13,61	-12,61	-13,73	-13,64	-12,52
12	19,65	-9,32	-11,23	-12,06	-12,41	-11,13
13	15,98	-12,97	-13,48	-11,78	-13,92	-12,47
14	16,05	-12,09	-13,74	-13,84	-13,80	-13,49

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 4, prise du mois de mai

	Latitude			Longitude			Altitude (m)	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	36	3	52,9	5	20	14,7	915	31,79	-10,54	-12,46	-12,75	-12,18	-11,35
2	36	3	52,6	5	20	15,8	914	24,40	-7,16	-9,69	-10,02	-9,54	-8,53
3	36	3	52,4	5	20	16,8	914	22,18	-11,87	-12,51	-13,83	-14,02	-14,19
4	36	3	52,1	5	20	18	914	23,40	-13,07	-13,56	-13,25	-15,49	-14,52
5	36	3	53,2	5	20	18,4	914	21,68	-12,30	-14,18	-14,03	-14,00	-14,59
6	36	3	53,5	5	20	17,5	914	22,15	-12,81	-14,23	-13,40	-13,12	-13,38
7	36	3	53,6	5	20	16,4	914	27,64	-12,89	-13,47	-13,23	-13,13	-13,02
8	36	3	53,8	5	20	15,5	914	29,64	-8,29	-9,43	-10,62	-7,85	-8,29
9	36	3	55,1	5	20	15,9	914	33,07	-9,13	-7,69	-8,53	-10,38	-10,64
10	36	3	54,8	5	20	16,8	914	26,62	-15,89	-15,03	-15,15	-15,29	-15,08
11	36	3	54,5	5	20	17,9	914	24,85	-20,39	-14,53	-14,14	-18,32	-18,86
12	36	3	54,3	5	20	18,8	914	22,80	-13,53	-15,37	-14,92	-14,56	-14,68
13	36	3	55,5	5	20	19,2	914	25,87	-15,89	-15,65	-15,27	-15,74	-15,10
14	36	3	55,8	5	20	18,3	914	23,63	-18,12	-17,02	-17,32	-17,16	-16,62
15	36	3	56	5	20	17,3	914	26,46	-11,34	-11,86	-12,17	-12,27	-12,27
16	36	3	56,2	5	20	16,4	914	29,44	-8,91	-9,74	-9,60	-10,37	-8,91

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 4, prise du mois de juin

	Latitude			Longitude			Altitude (m)	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	36	3	52,9	5	20	14,7	915	32,03	-13,87	-10,95	-12,77	-12,85	-13,58
2	36	3	52,4	5	20	16,8	914	36,05	-10,99	-10,77	-11,70	-11,84	-13,25
3	36	3	52,1	5	20	18	914	26,99	-12,43	-12,48	-12,45	-11,09	-11,30
4	36	3	53,2	5	20	18,4	914	35,95	-9,78	-12,29	-10,58	-10,93	-13,42
5	36	3	53,5	5	20	17,5	914	28,03	-11,99	-13,17	-12,21	-10,60	-11,56
6	36	3	53,6	5	20	16,4	914	39,80	-10,74	-11,35	-11,80	-11,49	-13,09
7	36	3	53,8	5	20	15,5	914	30,77	-8,69	-11,12	-11,65	-11,68	-11,72
8	36	3	55,1	5	20	15,9	914	30,74	-12,03	-12,01	-11,60	-11,52	-10,86
9	36	3	54,8	5	20	16,8	914	22,76	-10,61	-11,52	-11,30	-10,25	-9,81
10	36	3	54,3	5	20	18,8	914	41,78	-7,30	-9,28	-9,19	-9,39	-9,68
11	36	3	55,5	5	20	19,2	914	19,34	-14,58	-13,92	-15,03	-13,33	-11,88
12	36	3	56,2	5	20	16,4	914	41,28	-8,30	-9,67	-11,59	-10,19	-10,69

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).

- Site 5, prise du mois de mai

	Latitude			Longitude			Altitude (m)	θ %	σ^0 Calibré	σ^0 SF 5*5	σ^0 SF 7*7	σ^0 SF 9*9	σ^0 SF 11*11
1	36	7	38,9	5	20	40	937	34,84	-7,17	-7,42	-8,36	-8,78	-8,88
2	36	7	38	5	20	40,8	937	28,69	-14,35	-14,42	-13,69	-13,21	-14,22
3	36	7	37	5	20	41,7	937	26,82	-15,63	-12,92	-13,60	-13,57	-15,07
4	36	7	36	5	20	42,7	937	33,12	-12,25	-12,08	-12,53	-12,66	-11,68
5	36	7	36,4	5	20	43,4	937	29,46	-14,00	-11,07	-10,66	-10,51	-10,51
6	36	7	37,2	5	20	42,7	937	34,20	-9,03	-11,04	-13,25	-12,95	-12,71
7	36	7	37,9	5	20	41,8	937	30,90	-10,90	-11,27	-11,79	-13,30	-11,69
8	36	7	38,8	5	20	41,3	937	29,58	-18,03	-14,60	-14,60	-14,16	-13,53
9	36	7	39,3	5	20	42	937	27,61	-15,94	-12,88	-13,80	-13,49	-13,67
10	36	7	38,5	5	20	42,8	937	32,55	-11,86	-10,58	-11,35	-10,73	-11,40
11	36	7	37,7	5	20	43,6	937	24,77	-13,11	-15,24	-14,06	-13,78	-13,60
12	36	7	37	5	20	44,2	937	24,58	-14,83	-12,63	-15,67	-15,38	-15,23

SF : Filtre du chatoiement (speckle filter).