

GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES AU MAGHREB



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Estimation de l'utilisation des eaux
souterraines à usage agricole sur la base
de données de télédétection.



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe



coopération
allemande

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT



OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL
SAHARA AND SAHEL OBSERVATORY

Auteurs: Fabian Stoffner et Dr. Clémence Dubois
Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles
(BGR), Département Télédétection, Hanover, Allemagne

Project: Coopération régionale pour une gestion durable des eaux souterraines
dans la région du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie) I & II

Commandité par: Le ministère fédéral de la Coopération économique et du
Développement (BMZ), Allemagne

Numéros du Projet BMZ: 2013.2289.0 (I) & 2017.2213.1 (II)

Numéro du projet BGR: 05-2369

Date: Janvier 2021

Y faire référence: Stoffner, F. et Dubois, C. (2021): Gestion Durable des Ressources
en Eaux Souterraines au Maghreb – Estimation de l'utilisation des
eaux souterraines à usage agricoles sur la base des données de
télédétection. Project n°05-2369.

Disponible: Online dans la bibliothèque et sur les sites web du BGR
www.bgr.bund.de/EN

Sommaire

Sommaire.....	III
Abréviations	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VIII
1. Étendu du travail	1
2. Zones de travail.....	2
3. Tunisie	3
3.1 Traitement optique – SPOT et RapidEye.....	4
3.1.1 Données.....	4
3.1.2 Méthodologie.....	5
3.1.3 Résultats	6
3.2 Traitement optique – Sentinel 2.....	9
3.2.1 Données.....	9
3.2.2 Méthodologie.....	12
3.2.3 Résultats	15
3.3 Traitement RADAR.....	19
3.3.1 Données.....	19
3.3.2 Méthodologie.....	19
3.3.3 Résultats	20
3.4 Transfert au DSS	39
3.4.1 Données.....	39
3.4.2 Méthodologie.....	39
3.4.3 Résultats	41
4. Algérie.....	42
4.1 Inventaire des points d'extraction des eaux souterraines	42
4.2 Traitement optique	42
4.2.1 Données.....	42
4.2.2 Méthodologie.....	43
4.2.3 Résultats	44
4.3 Traitement RADAR.....	47
4.3.1 Données.....	47
4.3.2 Méthodologie.....	48
4.3.3 Résultats et interprétation	48
5. Maroc.....	51

6.	Représentation du Project.....	52
6.1	Encadrement des étudiants stagiaires.....	52
6.2	Formation OSS	52
6.3	Présence dans les conférences.....	53
6.4	Publications.....	53
7.	Conclusions et travail à venir.....	54
8.	Références.....	55

Abréviations

ABH CSM	Agence du Bassin Hydrographique Constantinois - Seybousse - Mellegue
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
BGR	Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles
BMZ	Ministère fédéral de la Coopération économique et du Développement
CCI	Climate Change Initiative
DEM	Modèle d'élévation numérique
DRE	Direction des Ressources en Eau
DSA	Direction des Superficies Agricoles
DS	Distributed Scatterer
DSS	Système d'aide à la décision
EMD	Date d'émergence
ENVISAT	Environmental Satellite
ESA	Agence spatiale européenne
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
INAT	Institut National Agronomique de Tunisie
Kc	Crop coefficient
Kcb	Basal crop coefficient
Ke	Evaporation coefficient
LOS	Line of Sight
MD	Minimum Distance
ML	Maximum Likelihood
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
PP	Parallel Piped
PS	Persistent Scatterer
PSI	Persistent Scatterer Interferometry
RADAR	Radio Detection And Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small Baseline Subset
SPOT	Satellite pour l'Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVM	Support Vector Machine
TDM	Time Division Multiplexing
WEAP	Water Evaluation And Planning

Liste des figures

Figure 1: Vue d'ensemble des zones pilotes	2
Figure 2: Caractéristiques détaillées des zones pilotes. Source de l'arrière-plan: Google Earth.....	2
Figure 3: Superposition des données du terrain et des données satellites (SPOT, RGB, août 2015).....	6
Figure 4: Classification surveillée ML, Zoom (RapidEye, mai 2016)	7
Figure 5: Classification surveillée, MD (RapidEye, décembre 2015)	8
Figure 6: Piment Chili en août 2017	10
Figure 7: Grenadiers en août 2017.....	10
Figure 8: Oliviers en avril 2017.....	10
Figure 9: Approche des étapes de travail global de la cartographie des cultures	12
Figure 10: Classes principales des cultures et leurs macro-classes respectives	13
Figure 11: Profils NDVI multi-temporels : a) hiver 2016/2017 et b) été 2017.....	13
Figure 12: Représentation schématique des différents aspects multi-temporels.....	14
Figure 13: Résultats de classification; classification effectuée pour l'hiver sur la base de l'acquisition du 05.03.2017 et pour l'été pour l'acquisition du 19.08.2017, Sentinel 2 tuile SNE, des dates qui fournissent la meilleure séparabilité entre les classes selon les profils NDVI.	16
Figure 14: a) Carte de la date d'émergence hiver 2016/ 2017 et b), c) carte des besoins en eau pour mars 2017, Sentinel 2 tuile SNE.....	18
Figure 15: Carte de mouvement du sol pour PSI sur les données Sentinel 1	21
Figure 16: Carte de mouvement du sol SBAS sur les données TerraSAR-X	21
Figure 17: Carte de mouvement du sol pour SBAS sur les données ascending Sentinel 1..	22
Figure 18: Carte de mouvement du sol pour SBAS sur les données ascending Sentinel 1..	22
Figure 19: Carte de mouvement du sol pour SBAS sur les données ENVISAT ASAR.....	23
Figure 20: a) Carte de vitesse de traitement par PSI pour la région de Nebhana; b) Carte de vitesse de traitement par SBAS pour la région de Nebhana	24
Figure 21: a) Carte de vitesse de traitement par Envisat ASAR SBAS pour la région de Nebhana; b) Carte de vitesse de traitement par Sentinel 1 SBAS pour la région de Nebhana; les deux traitements sont effectués avec des séries de données descending	26
Figure 22: Carte de vitesse de traitement par Envisat ASAR SBAS pour la région de Nebhana et emplacements des piézomètres superposés. Les piézomètres choisis pour interprétation supplémentaire sont encadrés en couleur.....	27
Figure 23: Niveau d'eau souterraine (x) et mouvement correspondant (•) dans différents emplacements de piézomètres choisis	28

Figure 24: a) Carte de vélocité de traitement TerraSAR-X par SBAS pour la région de Nebhana; b) Carte de vélocité de traitement Sentinel 1 par SBAS pour la région de Nebhana; les deux traitements sont effectués avec des séries de données ascending.	29
Figure 25: a) Vélocité verticale de traitement Sentinel 1 par SBAS; b) Vélocité vers l'est de traitement Sentinel 1 par SBAS	30
Figure 26: Vélocité verticale de traitement Sentinel 1 par SBAS superposée avec a) délimitation des aquifères; b) masque des terres cultivées; c) puits des eaux souterraines; d) DEM (TanDEM-X)	32
Figure 27: a) Vélocité verticale de traitement Sentinel 1 par SBAS superposée avec a) la délimitation des unités géologiques et lithologiques; b) la carte géologique correspondante; c) la carte lithologique correspondante.	34
Figure 28: a) Zoom sur traitement Sentinel 1 par SBAS; b) image satellite correspondante; c) construction au centre du cluster de déformation; d) séries chronologiques correspondantes de l'affaissement principal	35
Figure 29: Imagerie optique multi-temporelle (Google Earth 2018).....	36
Figure 30: a) Emplacement géographique des piézomètres traitement de Sentinel 1 par SBAS; b) évolution du niveau des eaux souterraines pour les piézomètres choisis (2015-2017); c) évolution du niveau des eaux souterraines pour les piézomètres choisis (depuis 1973); d) mouvement du sol correspondant.....	38
Figure 31: Couche digitalisée d'oliviers	40
Figure 32: Illustration schématique des composantes du DSS	40
Figure 33: Classification par type de culture pour le DSS	41
Figure 34: Etapes de travail pour le traitement de la zone d'étude en Algérie.....	44
Figure 35: a) Données externes - bleu: masque plans d'eau, vert: masque zones forestières; b) écart-type du NDVI sur l'année 2017; c) masque des terres cultivées résultant après seuillage.....	45
Figure 36: Profils NDVI pour l'année 2017 pour quatre types de cultures différents en Algérie.	46
Figure 37: Carte de classification et matrice de confusion de la classification maximum likelihood pour la plaine de Remila	47
Figure 38: Résultat SBAS pour la plaine de Remila, Algérie, sur données ascending de Sentinel 1.	49
Figure 39: Zones retenues pour l'analyse.....	49
Figure 40: Zoom-up sur zones choisies et identification des puits; source d'imagerie optique: Google Earth	50
Figure 41: Examen de plus près des puits présumés; source d'imagerie optique: Google Earth	50

Liste des tableaux

Tableau 1: Présentation des données acquises SPOT et RapidEye.....	4
Tableau 2: Présentation des données du terrain relevées pour 2015 et 2016.....	5
Tableau 3: Présentation des données Sentinel-2 et des données du terrain.....	11
Tableau 4: Nombre des acquisitions disponibles et durée pour chaque détecteur retenu	19
Tableau 5: Méthode utilisée pour le traitement des différentes données.....	20
Tableau 6: Paramètres de traitement principaux pour les différentes séries de données.....	20
Tableau 7: Classes d'utilisation du sol pour le DSS	40
Tableau 8: Données Sentinel-2 acquises pour le traitement	43
Tableau 9: Nombre des acquisitions disponibles et durée pour chaque détecteur retenu	48

1. Étendu du travail

L'Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles (BGR) et l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) réalisent un projet régional pour une gestion améliorée des eaux souterraines dans la région du Maghreb. Les pays participants sont l'Algérie, le Maroc et la Tunisie. Le projet est commandité par le ministère fédéral de la Coopération économique et du Développement (BMZ) sur une période cumulée de 7 ans (janvier 2014 – décembre 2020).

Entre autres, cette coopération régionale dans le secteur de l'eau au Maghreb vise à appuyer les autorités régionales pour l'obtention d'informations qualitatives et quantitatives en matière d'utilisation de l'eau à usage agricoles, tout en cherchant à mettre en place une gestion durable des eaux souterraines au niveau régional. Dans le cadre de ce projet, le rôle du BGR est d'aider les institutions régionales à collecter et à échanger les informations hydrogéologiques pertinentes et à mettre en place des méthodes modernes et efficaces pour évaluer et surveiller les conditions des eaux souterraines. L'autre aspect important consiste également à former les administrations régionales en charge d'assurer la gestion durable des eaux souterraines.

Le département Télédétection du BGR contribue à ce projet avec l'utilisation des données satellitaires multi-spectrales et RADAR en vue d'évaluer et surveiller les besoins en eaux, essentiellement à usage agricoles. En particulier, il est question de procéder à des classifications de l'occupation du sol et des types de cultures à travers l'usage de données optiques, et de déterminer l'affaissement du sol en utilisant les données de RADAR. Le premier procédé vise à récupérer les paramètres pour le calcul des besoins en eau pour l'agriculture et le second à sensibiliser sur et quantifier le déversement des eaux souterraines à usage agricoles.

Ce rapport vise à établir une description des activités techniques majeures et des résultats obtenus, dans le contexte de cette coopération, par le département Télédétection du BGR jusqu'en juin 2020.

2. Zones de travail

L'aspect régional du projet implique le choix de plusieurs zones pilotes situées dans les pays concernés par le projet. Selon les points de départ / bases de référence, la qualité et la quantité des informations disponibles ainsi que l'opportunité d'acquérir de nouvelles informations, les autorités nationales ont choisi les emplacements suivants comme zones pilotes (voir Figures 1 et 2)

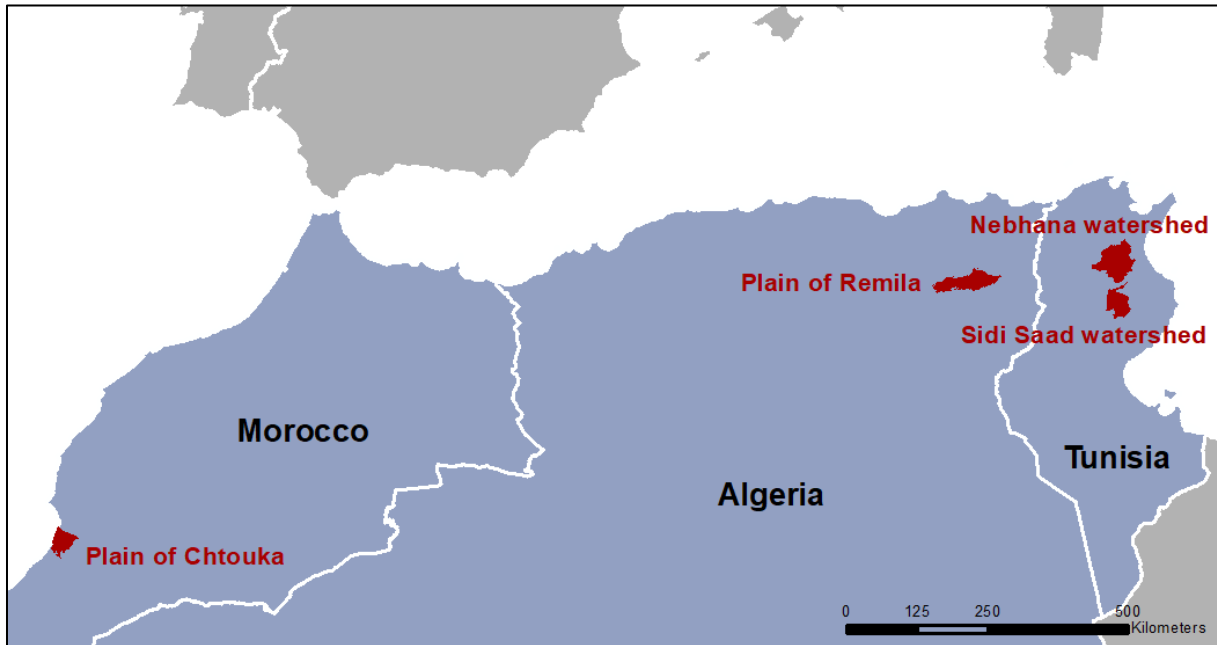


Figure 1: Vue d'ensemble des zones pilotes

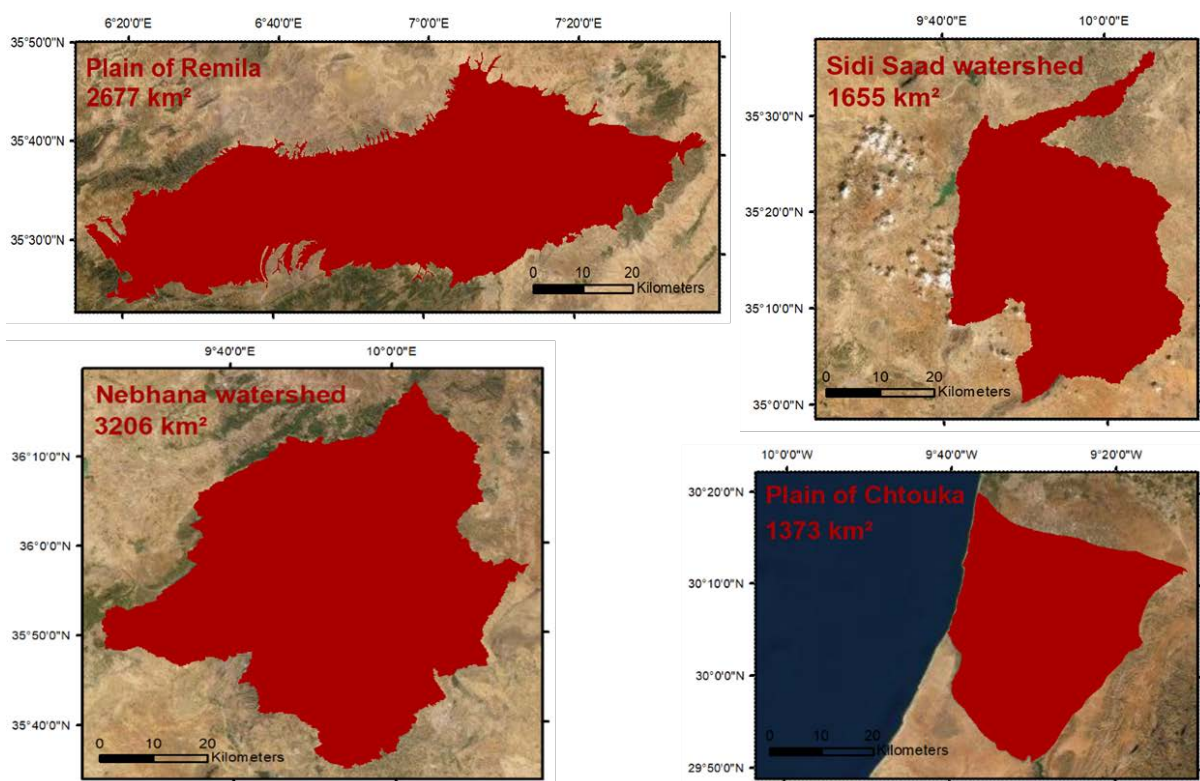


Figure 2: Caractéristiques détaillées des zones pilotes. Source de l'arrière-plan: Google Earth

3. Tunisie

En Tunisie, il est question de deux zones pilotes, le bassin versant de Nebhana et le bassin versant de Sidi Saad. Les analyses et produits de la télédétection sont testés et réalisés pour ces deux régions, tout en mettant plus de concentration sur Nebhana en raison de son importance pour les autorités locales en charge de l'eau. L'objectif final est de quantifier les volumes des eaux souterraines utilisées dans l'agriculture en se basant sur les analyses de la télédétection, tout en renforçant la sensibilisation au sujet de la surexploitation des systèmes aquifères sous-jacents. Trois méthodes ont été explorées:

- (1) Classification de l'occupation du sol à partir des données multi-spectrales SPOT et RapidEye (Chapitre 3.1 : Traitement optique – SPOT et RapidEye).

Les données du satellite commercial ont été acquises pour tester plusieurs approches de classification des cultures. Ces données sont utilisées pour vérifier l'adéquation de séparation en terme de couverture du sol dans les zones de l'étude en ce qui concerne la résolution spatiale et temporelle, notamment en comparaison avec et pour l'évaluation des données gratuites et ouvertes de Copernicus Sentinel 2 qui offrent une résolution spatiale basse mais une résolution multi-temporelle haute.

- (2) Classification de l'occupation du sol à partir des données multi-temporelles et multi-spectrales Sentinel 2 en vue d'estimer indirectement l'évapotranspiration des cultures et leurs besoins en eau (Chapitre 3.2 : Traitement optique – Sentinel 2).

Puisque les données Sentinel 2 ont été fournies par l'Agence spatiale européenne (ESA), elles sont utilisées dans une phase ultérieure du projet. Ces données satellitaires sont basées sur une politique de libre accès aux données, ce qui garantit, in fine, une durabilité financière en matière d'acquisition de données. En outre, les caractéristiques spatio-temporelles sont considérées comme adéquates pour les classifications d'occupation du sol.

- (3) Estimation de l'affaissement et du soulèvement du sol en utilisant les données RADAR pour une corrélation avec l'écoulement des eaux souterraines (Chapitre 3.3 Traitement RADAR).

Les analyses RADAR peuvent être une alternative à l'usage des données optiques. Il s'agit de mesurer le mouvement du sol sur la surface de la terre. Ces résultats sont ensuite comparés avec l'évolution des niveaux des eaux souterraines et les débits de pompage. Les données commerciales (TerraSAR) ainsi que les données RADAR Sentinel 1, libres d'accès, ont été utilisées.

Par ailleurs, un autre objectif du projet consiste à développer un système d'aide à la décision (DSS) pour le système hydraulique de Nebhana. Le DSS met en combinaison tous les aspects en relation avec le cycle de l'eau tel l'approvisionnement en eaux potables, le ruissellement en surface ou les impacts sur le système hydrogéologique dans le but de faciliter le travail quotidien du preneur de décision. Dès lors, l'approche du traitement optique est utilisée pour classer l'occupation du sol pour le DSS:

- (4) Classification de l'occupation du sol par l'usage des données multi-spectrales Sentinel 2 pour intégrer les résultats dans le DSS (Chapitre 3.4 : Transfert au DSS)




3.1 Traitement optique – SPOT et RapidEye

Ce chapitre fait état des analyses des données spatiales à haute résolution réalisées pour classifier les différents types de culture dans la région de Nebhana en utilisant les données satellitaires à trois dates distinctes.

3.1.1 Données

Pour la zone d'étude, les données satellitaires commerciales (SPOT 6/7 et RapidEye) sont acquises à trois dates différentes en vue de procéder aux classifications d'occupation du sol et d'identifier la dynamique agricole (Tableau 1). Ces dates sont choisies selon le calendrier des cultures et de façon à permettre une vue d'ensemble sur toutes les cultures pratiquées pendant une année. Les périodes des semailles et des récoltes dépendent des types des cultures et par conséquent il y a lieu de les considérer.

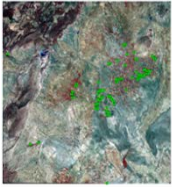
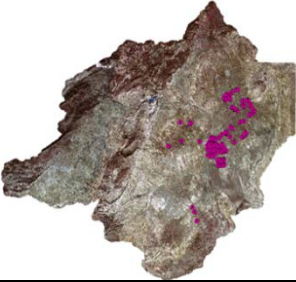
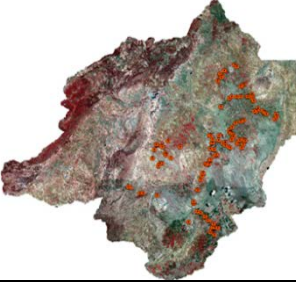
Tableau 1: Présentation des données acquises SPOT et RapidEye

			
Région	Bassin versant Nebhana, partiel	Bassin versant Nebhana, entier	Bassin versant Nebhana, entier
Superficie	2,743 km ²	3,446 km ²	3,446 km ²
Satellite	SPOT 6/7	RapidEye	SPOT 6/7
Date d'enregistrement	Août 2015	Décembre 2015	Mai 2016
Résolution spatiale	5 m	6 m	5 m
Résolution spectrale	4 bandes + pan	5 bandes	4 bandes + pan
Coûts	6.309 €	5.427 €	7.926 €

Des étapes de prétraitement, dont la correction atmosphérique pour la comparaison des différentes dates d'acquisition, sont réalisées pour toutes les données.

L'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), sous-contractant du projet, a réalisé des études sur le terrain pendant les périodes du relevé des données satellitaires (Tableau 2). Il a été procédé à la collecte d'informations sur les types de cultures de plusieurs parcelles. Ces données du terrain sont nécessaires pour comparer et valider les informations provenant des données satellitaires.

Tableau 2: Présentation des données du terrain relevées pour 2015 et 2016

			
Satellite	SPOT 6/7	RapidEye	SPOT 6/7
Date d'enregistrement	Août 2015	Décembre 2015	Mai 2016
Nombre de parcelles	117	310	157
Nombre de types de culture	23	40	23

Les parcelles des études sur le terrain ne sont pas les mêmes pour chaque date. À titre d'exemple, en décembre 2015 davantage de parcelles ont été enquêtées qu'en août 2015. En conséquence, une analyse de l'évolution individuelle des parcelles au fil du temps n'est pas possible. Les données de la réalité du terrain peuvent uniquement être utilisées comme une référence pour chaque date donnée. En outre, les données du terrain sont partiellement incorrectes en ce qui concerne la détermination du type de culture dans le terrain ou en ce sens que l'information de la parcelle ne peut parfois pas être attribuée clairement aux données satellitaires. La raison en est le fait que les collaborateurs et les partenaires du projet ont changé et la continuité n'a pas été garantie. Que de plus, la majorité du travail sur le terrain était réalisée par des étudiants universitaires qui n'avaient pas tous l'expérience suffisante. Ces aspects étaient des inconvénients pour l'analyse des données, mais qui ont été améliorés dans les phases ultérieures du travail sur le projet.

3.1.2 Méthodologie

Les données du terrain disponibles sont analysées en vue de comprendre les activités agricoles dans la zone du projet. Dès lors, les informations sur la variété des types de cultures et la période de culture correspondante (saison hivernale ou estivale) sont déterminées. En août 2015 et en mai 2016, 23 types de culture ont été identifiés, alors qu'en décembre 2015, 40 types de culture ont été spécifiés (Tableau 2).

Les différents types de culture sont alors matchés avec les données satellitaires dans le but de déterminer leur réflectance spectrale ainsi que les caractéristiques de leur séparabilité spectrale (Figure 3). Cette mesure est nécessaire pour voir comment les types de culture peuvent être distingués et dire s'il est possible de les séparer les uns des autres. Si les caractéristiques de la réflectance spectrale de deux (ou plus) types de cultures, poussant pendant la même période, sont trop similaires, une séparation est alors impossible.

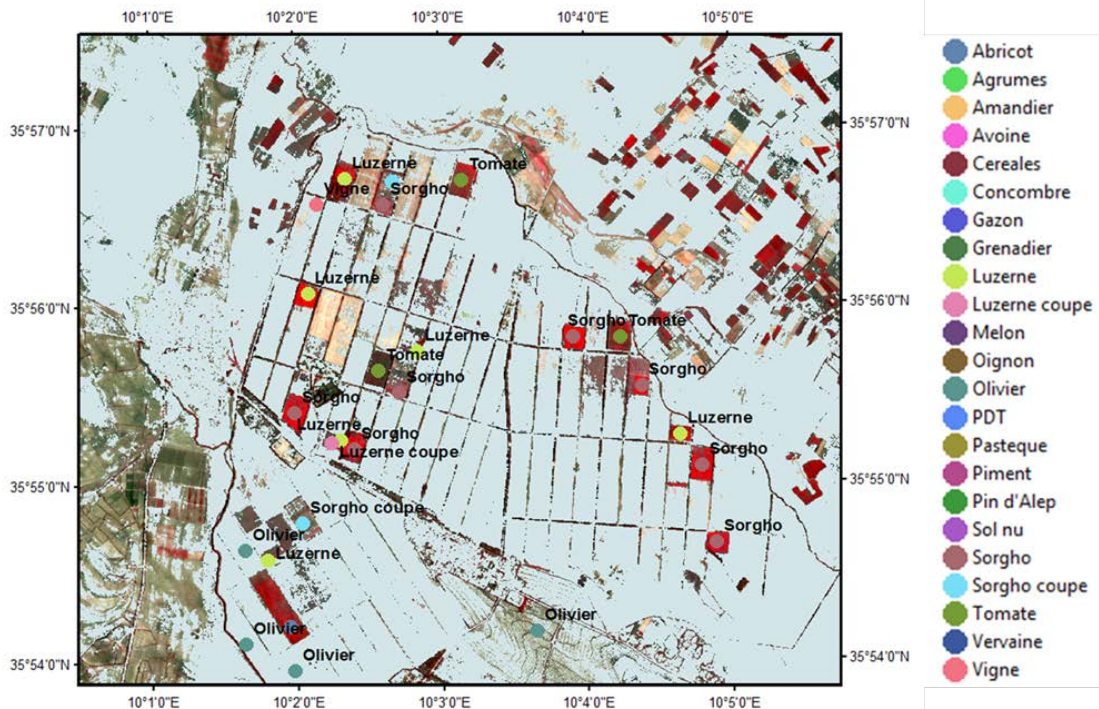


Figure 3: Superposition des données du terrain et des données satellites (SPOT, RGB, août 2015)

Par l'utilisation des données du terrain, plusieurs classifications supervisées qui considèrent tout type de culture comme des classes sont réalisées pour chaque date. Cela comprend les classifications avec les algorithmes minimum distance (MD), maximum likelihood (ML), parallel-piped (PP) et support vector machine (SVM).

Par ailleurs, et pour simplifier l'analyse et comparer les résultats, les types de culture individuels sont fusionnés dans les classes de culture. Les critères pour construire une classe de culture sont la réflectance spectrale et la période de croissance. Ainsi, la classe de culture comprend les types de culture individuels ayant réflectance spectrale similaire à la même date. Les classes testées sont : *terres cultivées*, *zones urbaines*, *plans d'eau*, *zones boisées* et *sol nu*. Puis il est procédé à une classification supervisée pour évaluer la séparabilité des classes fusionnées, particulièrement des zones agricoles.

3.1.3 Résultats

Les analyses de séparabilité des données du terrain pour les trois dates montrent qu'il existe plusieurs similarités entre les différents types de culture en ce qui concerne la réflectance spectrale et que les nombreux types de culture individuels ne peut être distingué avec les données de référence disponibles. En outre, les mêmes types de culture peuvent avoir des dates différentes de plantation et, donc, la période de croissance peut être différente. Cela signifie aussi que les phases de croissance différentes du même type de culture peuvent être observées pour la même date. Par conséquent, la réflectance spectrale d'un type de culture spécifique peut varier sur différentes parcelles agricoles. Les classifications réalisées montrent des résultats correspondants. Les différentes parcelles contiennent non seulement un type de culture comme il se doit, mais un grand nombre de types de culture différents comme il est mis en évidence dans la Figure 4. Une vue d'ensemble de la classification surveillée (RapidEye, décembre 2015) pour toute la zone du projet est donnée dans la Figure 5.

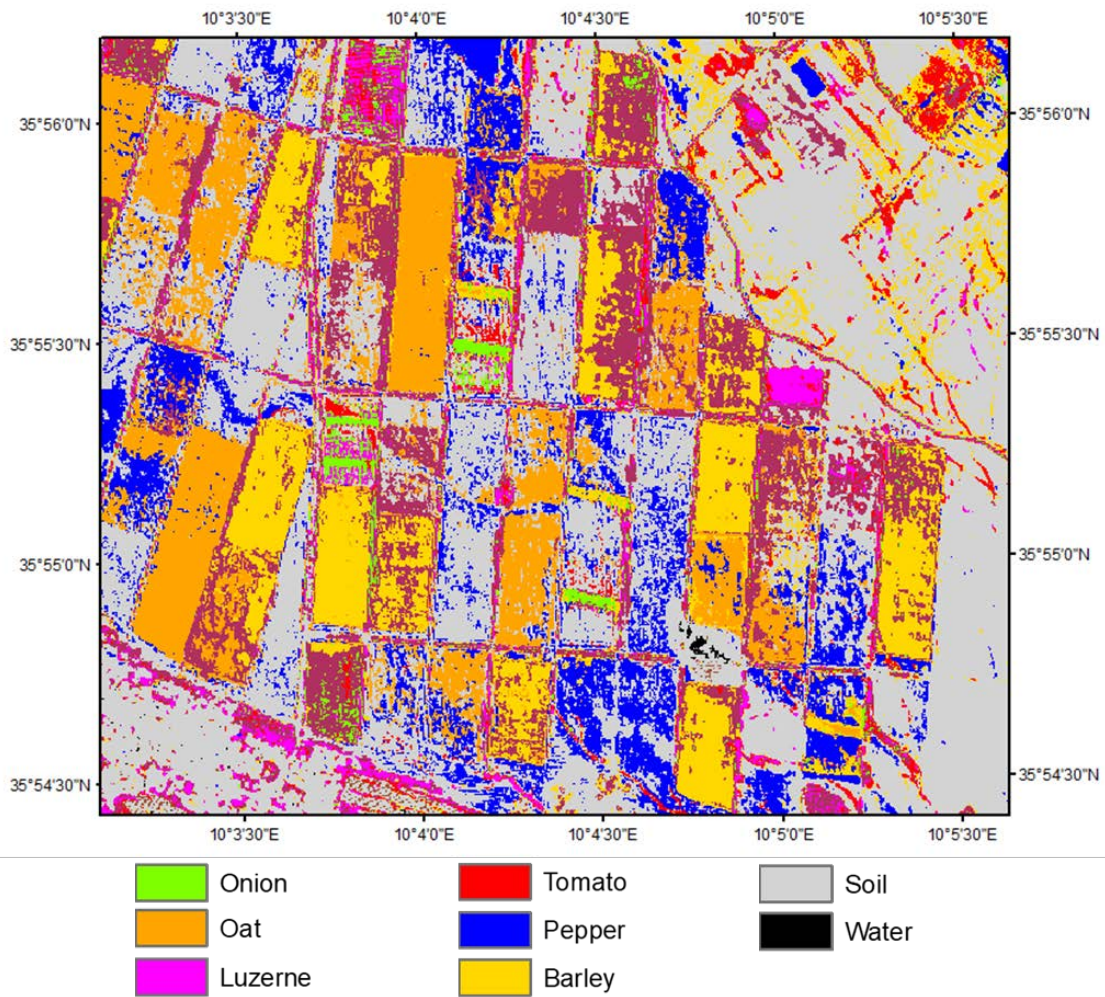
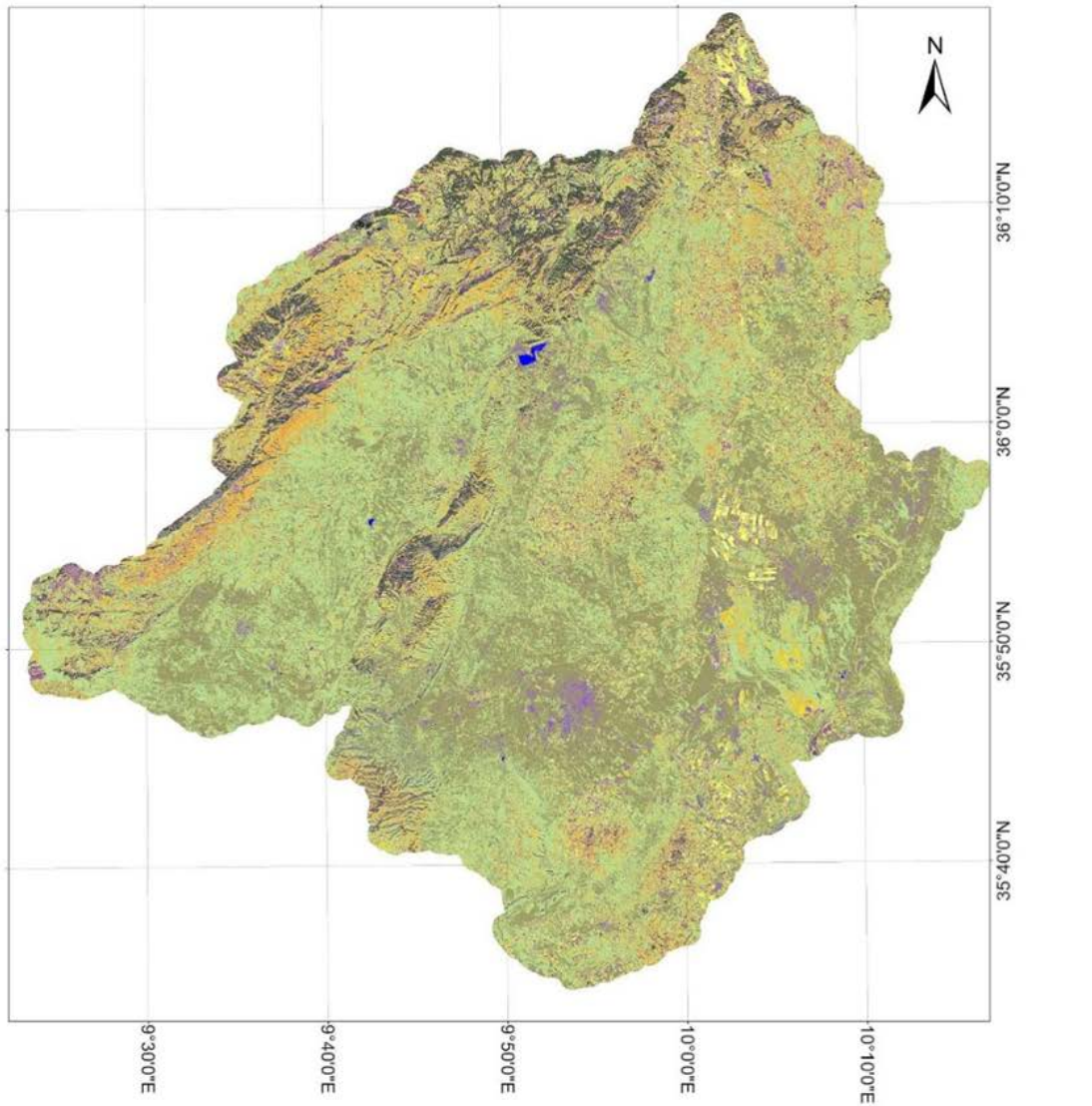


Figure 4: Classification surveillée ML, Zoom (RapidEye, mai 2016)



Legend

	Oat		Olive old		Citrus
	Oat forage		Olive + barley		Onion
	Oat + clover		Olive young + pea		Apricot old
	Oat seeded		Olive + carrot		Apricot young
	Oat + wheat		Olive + bean		Apricot + pea
	Carrot		Olive + clover		Pea
	Clover + wheat		Olive + pea		Water
	Clover		Olive young		Urban
	Lettuce		Fennel		Turnip
	Alfalfa + fallow		Parsley		Bare soil
	Alfalfa		Barley		Fallow
	Chard		Wheat + clover		Fallow + oat
	Mint		Wheat forage		Forest
	Bean		Wheat		Fallow + barley

Figure 5: Classification surveillée, MD (RapidEye, décembre 2015)

Cependant, les zones agricoles et leurs types de culture, comparées aux zones non-agricoles comme les zones urbaines, le sol nu ou les plans d'eau, peuvent bien être séparées par les classifications et les données du terrain. La confusion peut se faire entre certaines zones agricoles, notamment les cultures arboricoles, et les zones boisées. Les zones boisées dans la région de l'étude ont une densité inférieure, comme c'est le cas pour les plantations arboricoles.

A cause des données du terrain et l'information partiellement incorrecte, l'utilisation de données est limitée. Par conséquent, le calcul basé sur ces données de formation ainsi que la qualité est biaisé. Informations sur les types de culture et leur évolution au fil du temps qui sont plus fiables peuvent conduire à des résultats plus solides. Aussi, une validation indépendante basée sur des données du terrain additionnelle pour évaluer la qualité des classifications serait favorable.

Une résolution temporelle et spatiale plus haute des données satellitaires serait un avantage. Depuis 2015, le Programme Copernicus de la Commission Européenne en partenariat avec la ESA offre avec sa mission SENTINEL une imagerie satellitaire à haute résolution temporelle et à résolution spectrale avancée, et ses données sont disponibles pour tous dans le cadre de la politique de libre accès. Couplées avec une base de données des informations du terrain, ces données sont censées permettre une surveillance satellitaire des cultures avec plus de détails et de fiabilité.

3.2 Traitement optique – Sentinel 2

Cette partie présente la méthodologie développée pour la classification de l'occupation du sol et la détermination qui s'en suit du besoin en eau par culture en Tunisie en utilisant les données Sentinel 2. La plupart des sous-sections qui suivent sont basées sur (Dubois et al., 2018).

3.2.1 Données

Pour l'étude, les besoins en eau de la région pour deux saisons agricoles différentes sont analysés, à savoir l'hiver 2016/2017 et l'été 2017. La saison hivernale en Tunisie s'étend généralement d'octobre à avril, et la saison estivale de mai à septembre. Les cultures les plus importantes pendant l'hiver sont les céréales, les plantes fourragères, les petites légumes (principalement les pois) et les plantations arboricoles. Pendant l'été, seuls les légumes, les arbres et quelques plantes fourragères sont d'importance pour le bilan hydrique. La méthodologie développée vise à réaliser une classification d'occupation du sol en utilisant l'information multi-temporelle pour mieux distinguer les différents types de culture.



Figure 6: Piment Chili en août 2017



Figure 7: Grenadiers en août 2017



Figure 8: Oliviers en avril 2017

Etant gratuites et libre d'accès, les données Copernicus disponibles par Sentinel 2 sont utilisées pour obtenir une couverture temporelle régulière et élevée de la région en vue de suivre l'évolution des différents types de culture. Les données acquises concernées et la réalité du terrain correspondante sont énumérées dans le Tableau 3. Pour la saison hivernale, toutes les images sans nuages disponibles ont été considérées, alors que pour la saison estivale seulement une série de données sans nuages par mois est considérée - correspondant à la date des campagnes spécifiques de réalité du terrain -, et ce pour garder le temps de calcul bas. Comme il a été dit auparavant, particulièrement en été dans cette région, moins de types de culture distincts sont attendus par rapport à l'hiver, ce qui permet une analyse multi-temporelle des différents types de culture basée sur un flux mensuel de données.

Dans le but d'obtenir une référence suffisante et d'effectuer une analyse temporelle détaillée des différents types de culture, des données mensuelles du terrain ont été acquises pour analyser l'évolution spécifique des différentes cultures dans la région. Au total, 357 parcelles de référence sont observées et surveillées chaque mois, pour un total en superficie de 1.221 km² et une zone agricole de 481 km². La zone mentionnée est plus petite que la zone entière de l'étude puisque, pour le développement de la méthodologie, seulement une tuile de Sentinel 2 a été considérée dans le but de garder le temps de calcul bas. La zone correspond par conséquent à la zone cartographiée dans une seule tuile Sentinel 2 (tuile SNE). Mais la méthodologie est reproductible pour des zones plus grandes. Comme les données du terrain sont acquises en considérant 55 types de culture différents (sous-classes), chaque type de culture est représenté seulement par quelques parcelles. Dès lors, pour assurer un résultat sûr et fiable, la classification se fait sur la base de 70% de données du terrain et la validation sur la base de 30% de données du terrain.

Tableau 3: Présentation des données Sentinel-2 et des données du terrain

Données du terrain	Acquisitions Sentinel-2 pour les cultures d'hiver	Acquisitions Sentinel -2 pour les cultures d'été
Nov. 2016 Semaine 46	03.10.2016	
	06.10.2016	
	18.10.2016	
	28.10.2016	
	25.11.2016	
Déc. 2016 Semaine 52	02.12.2016	
	01.01.2017	
19.08.2017 21.09.2017 18.10.2017	24.01.2017	
	31.01.2017	
	03.02.2017	
Fév. 2017 Semaine 8	23.02.2017	
	02.03.2017	
	05.03.2017	
Mar. 2017 Semaine 12-13	12.03.2017	
	01.04.2017	
Avr. 2017 Semaine 17-18	14.04.2017	24.04.2017
	24.04.2017	
	01.05.2017	
Mai 2017 Semaine 21-22		24.05.2017
		13.06.2017
Juillet 2017 Semaine 27		13.07.2017
Août 2017 Semaine 31-32		
Sept. 2017 Semaine 37-38		

3.2.2 Méthodologie

Le flux de travail méthodologique est présenté dans la Figure 9. Se penchant sur une *layer stack* de Sentinel 2 sur une saison, les données sont tout d'abord prétraitées pour corriger l'influence de l'atmosphère et du relief, et un masque de culture est utilisé pour considérer uniquement les zones agricoles pour les étapes suivantes du traitement. Et pour se concentrer sur le besoin en eau spécifique pour usage agricole, l'on utilise le masque Cropland de la carte d'occupation du sol ESA CCI land cover – S2 prototype land cover 20m map of Africa 2016 (CCI Land Cover, 2017), qui est bien défini pour la zone d'étude. Dans une seconde étape, le NDVI est calculé pour chaque série de données. Sur la base des données du terrain acquises ainsi que les séries temporelles NDVI, l'on calcule les profils NDVI pour les différents types de culture. Cinq macro-classes sont considérées sur la base des 55 sous-classes de cultures consolidées: céréales, plantes fourragères, arbres, légumes et sol nu. Ces cinq macro-classes sont identifiées comme correspondant aux besoins spécifiques en eau selon la FAO (Allen, 1998).

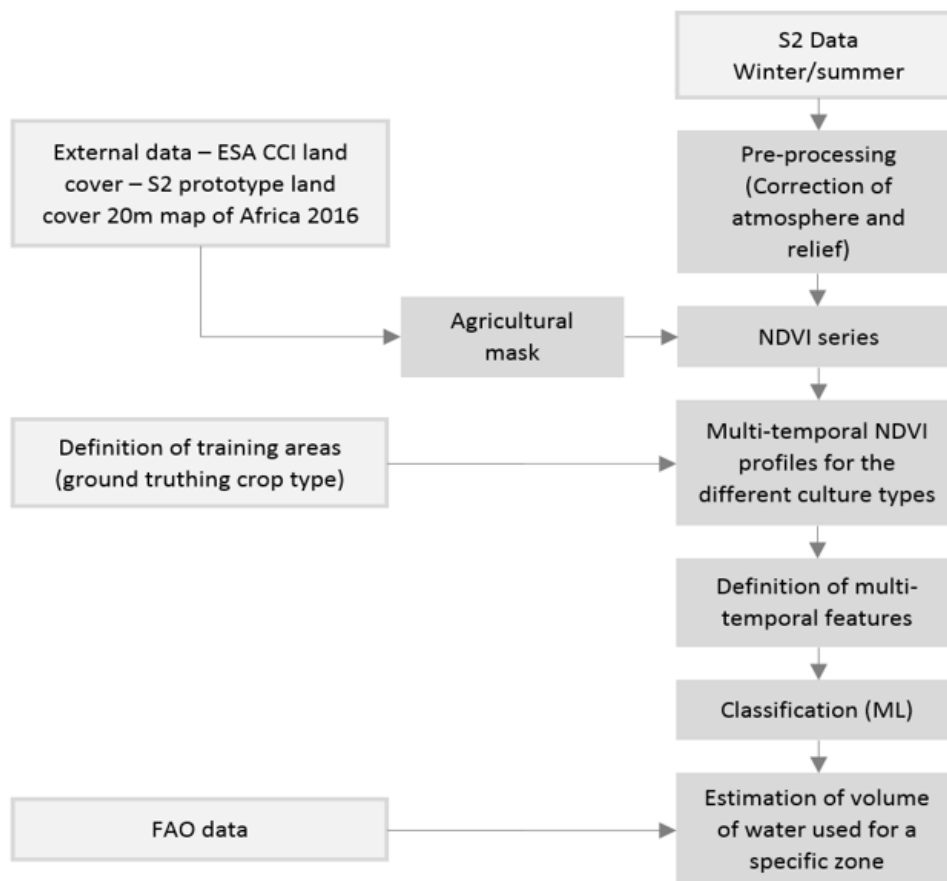


Figure 9: Approche des étapes de travail global de la cartographie des cultures

La Figure 10 montre une vue d'ensemble des principales sous-classes regroupées dans ces macro-classes pour chaque saison. Les sous-classes d'une macro-classe ont généralement des besoins en eaux très similaires pendant la même période. Pour chaque macro-classe, la valeur moyenne du NDVI est calculé en utilisant les données du terrain correspondantes (Tableau 3). Les profils qui en résultent sont représentés dans la Figure 11a et b respectivement pour les saisons d'hiver et d'été.

Macro-classe	Sous-classe principale – Hiver	Sous-classe principale - Été
Arbres	Olivier	Olivier
		Abricotier
		Agrumes
Céréales	Avoine	
	Blé	
	Orge	
Fourrages	Trèfle	Trèfle
	Orge verte	
Légumes	Pois	Pois
	Haricots	Pastèque
		Poivron
Sol nu	Sol nu, Paille	

Figure 10: Classes principales des cultures et leurs macro-classes respectives

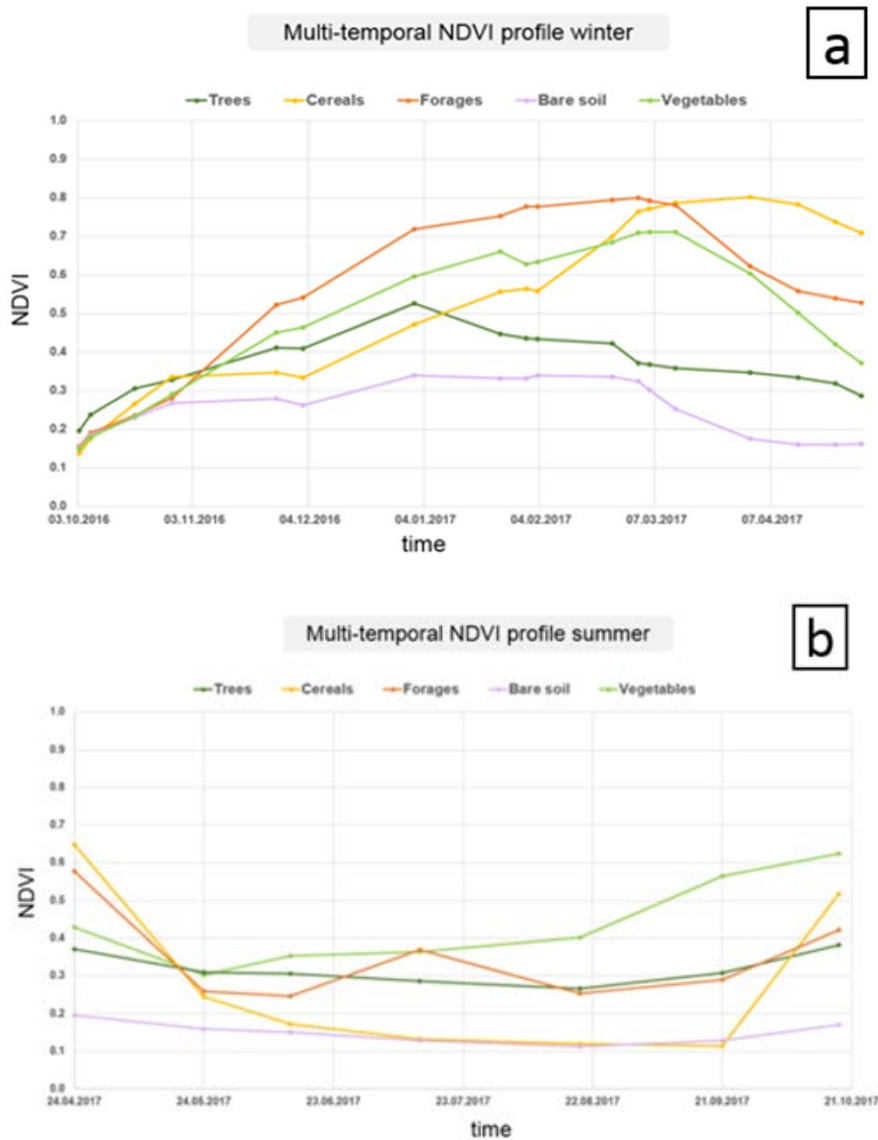


Figure 11: Profils NDVI multi-temporels : a) hiver 2016/2017 et b) été 2017

L'analyse des profils mène à la détermination et la création d'aspects multi-temporels spécifiques qui permettent une meilleure distinction entre les différentes classes de culture. Au total, quatre aspects multi-temporels du NDVI ont été identifiés comme utiles pour faire la distinction entre les différentes classes de culture et sont donc retenus pour établir ultérieurement la cartographie des cultures : maximum, différence maximum-minimum, pente maximale et date d'émergence (EMD). Ces aspects sont représentés schématiquement en Figure 12. Plus de détails peuvent être trouvés dans (Dubois et al., 2018). Ces aspects supplémentaires sont ensuite utilisés pour la classification de l'occupation du sol qui vise à différencier entre les classes de culture principales correspondant aux différents besoins en eau.

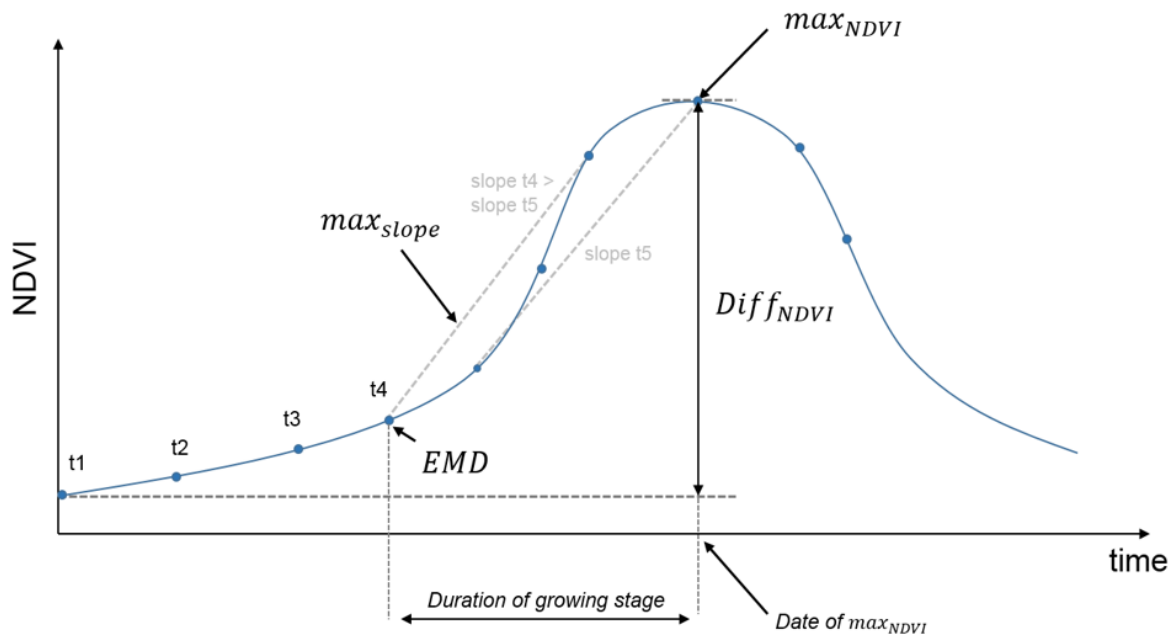
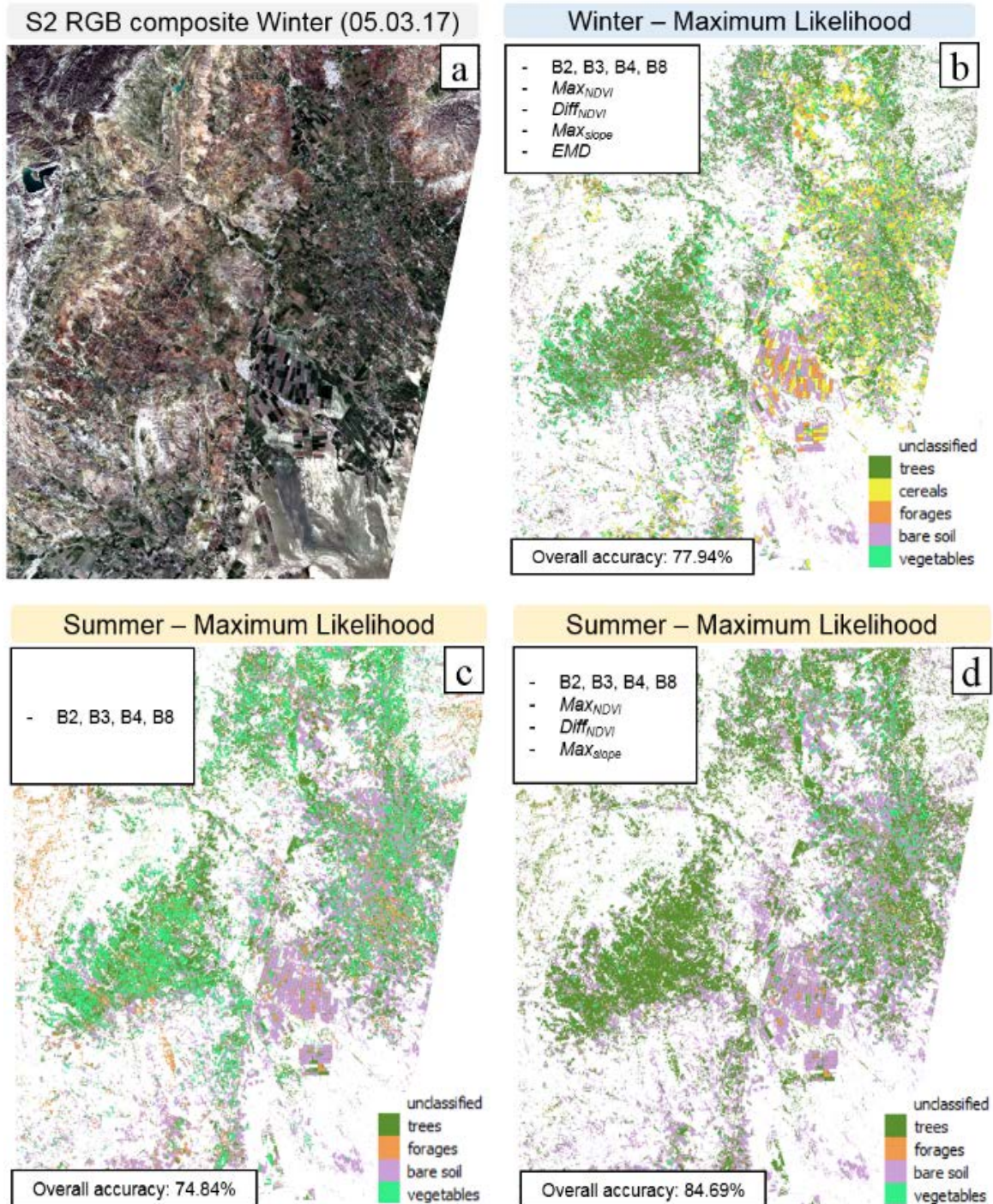


Figure 12: Représentation schématique des différents aspects multi-temporels

La classification *maximum likelihood* (ML) est appliquée sur les macro-classes en utilisant toutes les bandes spectrales de Sentinel 2 ainsi que les aspects multi-temporels supplémentaires. Sur la base des résultats de cette classification, le besoin en eau par culture est estimé. À cette fin, un outil (tableau Excel) basé sur la méthode FAO (Allen, 1998) a été élaboré. Il vise à déterminer l'évapotranspiration culturelle qui caractérise le besoin en eau pour une culture donnée à travers la détermination de l'eau utilisée par la culture à travers l'évaporation et la transpiration sous des conditions idéales. Utilisant essentiellement des données climatiques et les normes FAO, l'on a déterminé une évapotranspiration de référence ainsi que des coefficients par culture pour arriver au calcul de l'évapotranspiration d'une culture donnée. Les résultats de la cartographie des cultures sont utilisés pour affiner le calcul et ajuster les valeurs du coefficient de culture selon la norme FAO aux conditions locales. Les macro-classes infèrent dans la détermination du coefficient de la culture spécifiée. La superficie respective de chaque macro-classe sert comme facteur pondérant pour le calcul du volume total d'eau nécessaire pour toute la zone agricole. En plus de l'évapotranspiration, le besoin effectif en eau est déterminé pour chaque mois en procédant à la soustraction de la pluviométrie effective qui peut être obtenue des données climatiques. Une explication détaillée des différentes formules et résultats intermédiaires peut être consultée sur (Dubois et al., 2018).

3.2.3 Résultats

Dans la présente section, les résultats de classification pour les macro-classes ainsi que pour l'estimation des besoins en eau sont présentés et discutés. Les résultats de la classification (tuile SNE) pour les différentes saisons agricoles et les combinaisons classificateur/bande sont présentés dans la Figure 13.



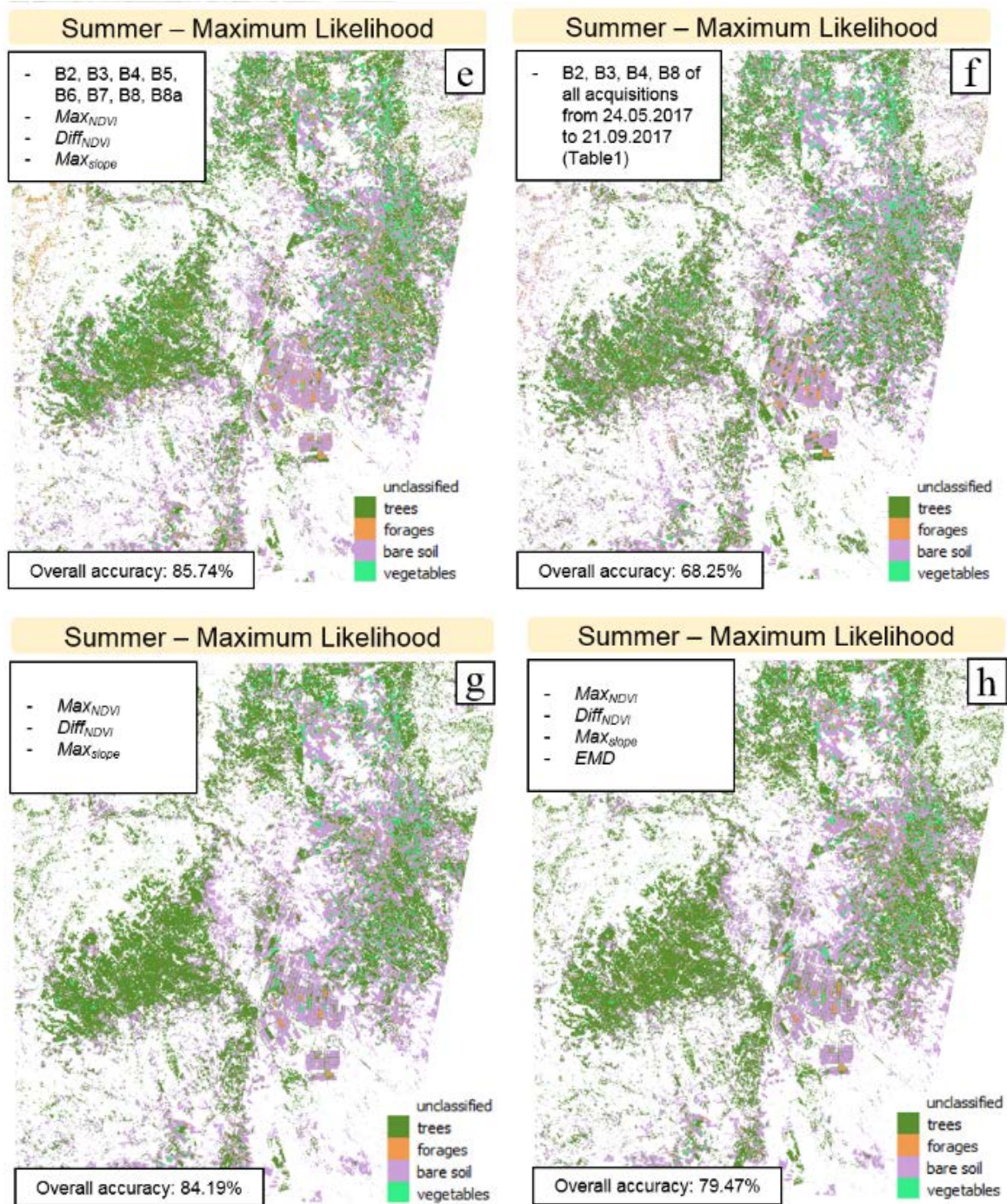


Figure 13: Résultats de classification; classification effectuée pour l'hiver sur la base de l'acquisition du 05.03.2017 et pour l'été pour l'acquisition du 19.08.2017, Sentinel 2 tuile SNE, des dates qui fournissent la meilleure séparabilité entre les classes selon les profils NDVI.

Pour la classification d'hiver, cinq classes sont considérées. La classification est réalisée par l'utilisation de l'algorithme *maximum likelihood* (ML). Un regard sur la matrice de confusion, pour analyser la qualité de la différenciation entre les céréales et les plantes fourragères, révèle une bonne *producer's accuracy* pour les plantes fourragères (67%). Pour la macro-classe céréales, ML réalise une *user's accuracy* de 76%. Une *producer's accuracy* élevée montre une exactitude élevée de la classification alors qu'une *user's accuracy* élevée représente une haute fiabilité. Cela est important comme il montre que les plantes fourragères et les céréales peuvent bien être distinguées en utilisant l'approche proposée même si elles

sont spectralement très similaires. Cette séparation entre les plantes fourragères et les céréales est importante puisque l'expérience montre que les besoins en eau des uns sont différents des autres.

Pour la classification d'été, seulement quatre classes sont considérées puisque les céréales ne se cultivent pas en été. Différentes bandes et aspects multi-temporels sont analysés. La meilleure *overall accuracy* (85,74%) est réalisée en utilisant 8 bandes de Sentinel 2 (Figure 13e) et les aspects multi-temporels Max_{NDVI} , $Diff_{NDVI}$ et Max_{slope} . L'utilisation des quatre bandes principales seulement (Figure 13d) et les mêmes aspects, donne une *overall accuracy* similaire (84,69%). Et puisque l'utilisation de moins de bandes permet un traitement rapide de la classification, l'utilisation de seulement quatre bandes spectrales est retenue. Pour étudier la contribution des aspects multi-temporels, différentes analyses sont réalisées : l'usage de quatre bandes spectrales seulement (Figure 13c) donne une *overall accuracy* de 74,84%, soit 10% de moins lorsque l'on utilise les bandes spectrales ensemble avec les aspects multi-temporels. Notamment pour les arbres, les *producer's accuracies* et *user's accuracies* sont dans ce cas d'environ 37%, également visibles dans les résultats de classification, du moment que les plantations d'arbres dans l'Ouest ont été classées comme légumes. La *user's accuracy* des légumes est dans ce cas seulement 18%. L'utilisation des quatre bandes spectrales de toutes les acquisitions estivales (Figure 13f) au lieu des aspects multi-temporels donne une *overall accuracy* inférieure (68,25%). Au contraire, l'utilisation uniquement des aspects multi-temporels pour la classification (Figure 13g), sans les bandes spectrales et l'aspect date d'émergence, donne une très bonne *overall accuracy* de 84,19%. L'ajout de l'aspect temporel EMD (Figure 13h) détériore légèrement la précision (79,47%). Cela peut s'expliquer puisque la date d'émergence ne peut pas toujours caractériser un type spécifique de culture, mais dépend principalement de la date de semences qui dépend des pratiques agricoles. Par conséquent, la date d'émergence est une information utile pour les autorités afin de savoir quand une culture a besoin de plus de prise d'eau et de déterminer ensuite le coefficient par type de culture ; mais cet aspect doit être utilisé seulement comme information supplémentaire à la classification du type de culture et non directement pour la classification. Un examen plus attentif de la matrice de confusion des résultats des deux meilleures classifications nous révèle une très bonne classification des plantes fourragères et du sol nu. Aussi les *producer's accuracies* pour les arbres et les légumes sont très élevées (environ 90%). La *user's accuracy* pour les légumes est d'environ 60% et celle des arbres d'environ 50%, ce qui signifie que pendant l'été seulement 50% des arbres classifiés sont réellement des arbres. Pendant l'hiver, la *user's accuracy* des arbres est d'environ 80% et les plantations d'arbres ne changent pas d'année en année ; il est préférable d'utiliser le masque arboré pour la classification d'hiver puisque c'est plus fiable.

Les matrices de confusion avec les *producer's* et *user's accuracies* correspondantes sont fournies en Annexe 1.

Sur la base des résultats de classification, on calcule les besoins en eaux pour un mois donné ou une saison donnée. En utilisant un outil développé en combinaison avec des données climatiques gratuitement disponibles, une quantité totale d'eau de 20Mm³ a été estimée pour le mois de mars 2017 dans la zone d'étude. Aucune validation directe n'est possible pour 2017. Cependant, la consommation d'eau de certaines zones dans cette région est connue par les autorités pour la saison d'hiver 2015-2016. Même si les cultures n'étaient pas probablement identiques comparativement à la saison hivernale 2016-2017, nous avons comparé la consommation en eau de l'une de ces zones en mars 2016 avec le besoin estimé

en eau pour mars 2017, et ce pour valider l'ordre de magnitude. Pour cette zone d'une superficie de 478ha, la référence de mars 2016 indique une consommation en eau de 120.919 m³. Pour la même région en mars 2017, le calcul donne 149.186 m³, soit le même ordre de magnitude. Ce résultat est très encourageant, sachant notamment que la quantité d'eau indiquée en mars 2016 correspond au volume d'eau qui a été facturé par les fournisseurs d'eau et peut être légèrement sous-estimé en comparaison avec la consommation réelle en raison de la présence potentielle des forages non déclarés.

En utilisant les résultats de la classification (tuile SNE), l'on présente une carte de la date d'émergence caractérisant la période de l'année où les cultures commencent à avoir besoin d'eau (Figure 14a) et une carte du besoin d'eau pour mars 2017 (Figure 14c), dérivées de l'évapotranspiration de la culture pour mars 2017 (Figure 14b).

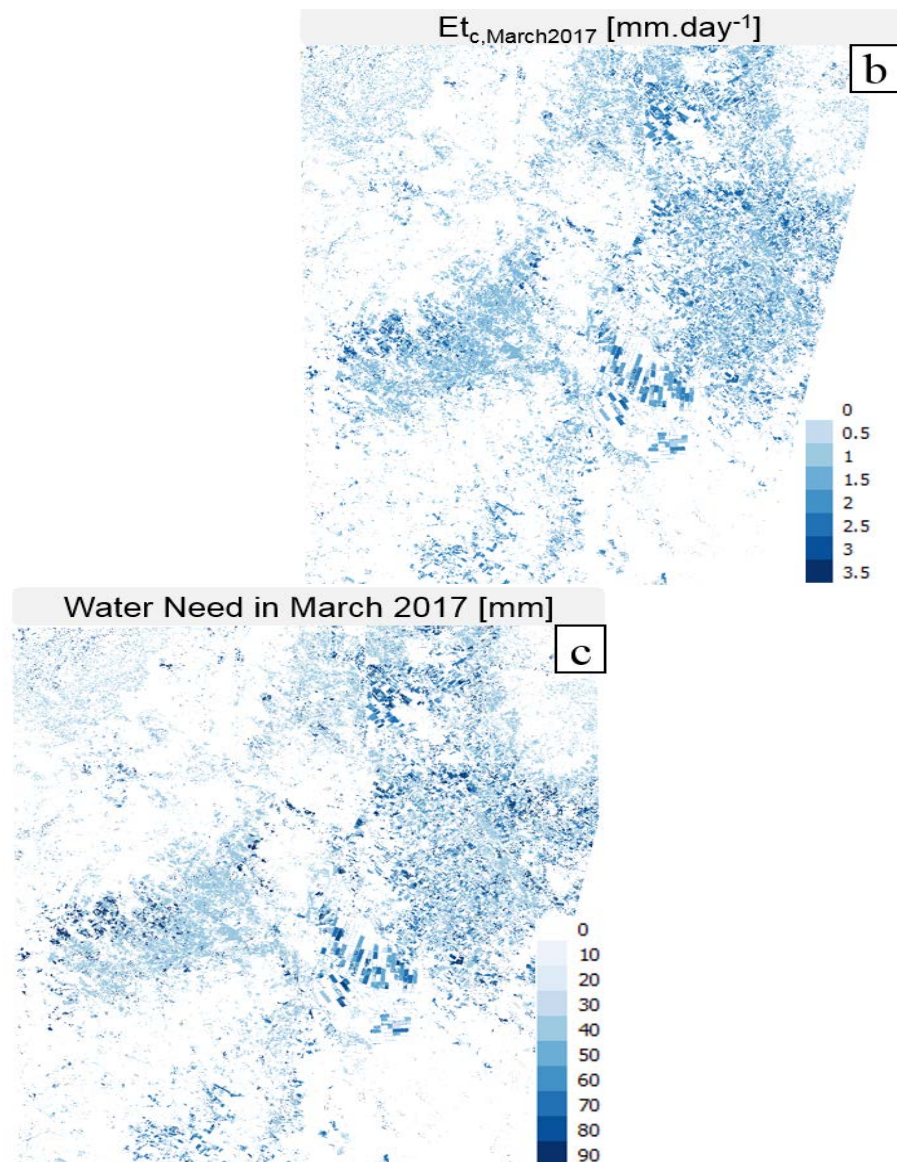


Figure 14: a) Carte de la date d'émergence hiver 2016/2017 et b), c) carte des besoins en eau pour mars 2017, Sentinel 2 tuile SNE

3.3 Traitement RADAR

3.3.1 Données

Pour la Tunisie, les missions satellitaires en cours (données commerciales de TerraSAR-X et les données libres d'accès de Copernicus Sentinel 1) ainsi que les données d'archive (données à accès libre d'Envisat ASAR) ont été étudiées. Le Tableau 4 récapitule le nombre des acquisitions disponibles pour chaque série de données. Une présentation générale des séries de données acquises avec les dates d'acquisition est fournie en Annexe 2.

Tableau 4: Nombre des acquisitions disponibles et durée pour chaque détecteur retenu

	Ascending	Descending
Envisat ASAR	-	22 séries de données, de 09.2003 à 09.2010
TerraSAR-X	15 séries de données, de 12.2015 à 06.2016	-
Sentinel 1	91 séries de données, de 03.2015 à 07.2017	86 séries de données, de 02.2015 à 07.2017

Le nombre de données disponibles depuis Envisat ASAR et TerraSAR-X est bas pour faire l'analyse du mouvement du sol. Néanmoins, l'intervalle entre les acquisitions de TerraSAR-X est de seulement 11 jours, la détection des *scatters* cohérents, même sur la période limitée, est possible ce qui permet de réaliser une estimation solide du mouvement du sol. Le nombre des acquisitions d'Envisat ASAR est légèrement supérieur mais pour une période de plusieurs années. L'intervalle moyen entre les acquisitions est très long (de 1 mois à plus de 2 ans). Ce dernier point implique que les *scatters* cohérents pour l'analyse du mouvement du sol ne peuvent pas être détectés solidement.

Le nombre de données disponibles depuis Sentinel 1 est supérieur, l'acquisition enregistrant une augmentation par un facteur de deux (allant de chaque douze jour à chaque six jours) en octobre 2016. Les données Sentinel 1 sont disponibles dans les deux directions d'acquisitions, ce qui permet une comparaison et une complémentarité du mouvement du sol des deux directions. En outre, avec cette configuration *ascending/ descending*, il demeure possible de faire un calcul du mouvement vertical réel ainsi que la composante du mouvement est-ouest de la zone.

La couverture du sol diffère pour chaque détecteur (Figures 15-19). Pour TerraSAR-X et Envisat ASAR, toute la scène a été considérée pour le traitement. Pour TerraSAR-X en raison de la couverture de zone nécessaire pour englober le processus intégral du mouvement, et pour Envisat en raison du volume beaucoup plus bas de données ce qui permet un traitement rapide même avec les scènes entières. Pour Sentinel 1, seulement les *swaths* et *bursts* couvrant la zone d'étude ont été utilisés dans le but de réduire le temps de calcul.

3.3.2 Méthodologie

La détermination du mouvement du sol a été réalisée par l'usage à la fois des méthodes interférométriques RADAR : PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) et SBAS (*Small Baseline Subset*). La PSI vise à détecter les points cibles cohérents à long terme (*persistent scatterers*, PS), généralement créés par des réflecteurs d'angle robustes d'objets manufacturés, démontrant des valeurs de réflectivité très stables au fil du temps. La PSI est donc convenable pour l'analyse des zones urbaines. Le SBAS vise la détection des *distributed scatterers* (DS)

dont la réflexion ajoutée demeure cohérente au fil du temps. Le SBAS est plus adapté pour l'analyse des zones rurales où les PS ciblés sont rares mais où les cibles DS existent. Dès lors, le SBAS a été utilisé pour toutes les séries de données puisqu'il permet une analyse couvrant toute la région et non seulement liée aux zones urbaines. La PSI a été appliquée pour l'exhaustivité, notamment pour montrer la densité des points cibles dans les résultats comparés au SBAS. Le Tableau 5 récapitule quelles données ont été traitées et selon quelle méthode. Au total, cinq calculs ont été réalisés.

Tableau 5: Méthode utilisée pour le traitement des différentes données

	PSI	SBAS
Envisat ASAR	-	Toute la série de données (voir Annexe 2)
TerraSAR-X	-	Toute la série de données (voir Annexe 2)
Sentinel 1	Du 02.07.2015 au 14.06.2016, ascending	Toute la série de données – ascending (voir Annexe 2) Toute la série de données – descending (voir Annexe 2)

Puisqu'il était possible avec Sentinel 1 de faire l'estimation du mouvement du sol dans les deux sens des acquisitions, le mouvement vertical réel et aussi le mouvement est-ouest ont été dérivés en utilisant les géométries respectives. À cause de la constellation orbitaire des satellites, une estimation du mouvement dans le sens nord-sud n'est pas possible.

3.3.3 Résultats

Le Tableau 6 résume pour chaque série de données les principaux paramètres de traitement. Les paramètres de traitement ont été utilisés selon la qualité des données et les périodes de temps considérées. Les différentes cartes de mouvement du sol correspondantes au Tableau 6 sont présentées dans les Figures de 15 à 19.

Tableau 6: Paramètres de traitement principaux pour les différentes séries de données

	Envisat ASAR	TerraSAR-X	S1-PSI	S1-SBAS asc.	S1-SBAS desc.
Max Normal Baseline	75%	30%	-	30%	30%
Max Temporal Baseline	730d	40d	-	60d	60d
Allow disconnected blocs	True	False	-	True	True
DEM	SRTM-3 V4	SRTM-3 V4	SRTM-3 V4	TDM	TDM
Number of GCPs	213	25	1 per 25km ²	85	84 (same as for Asc.)
3D Unwrapping	False	True	-	False	False
Decomposition Level	2	1	-	1	1
Atmospheric high-pass Filter	365d	365d	365d	365d	365d
Atmospheric low-pass filter	1200m	2000m	2000m	2000m	2000m
Product Coherence Threshold	0.1	0.4	0.75	0.35	0.35
Max/Min Velocity	-	-	+/-25mm	-	-
Number of effective scenes	14	14	27	89	77
Number of effective interferograms	25	27	26	247	250

Les apparences différentes entre PSI et SBAS sont dues au fait que le résultat de l'analyse de la PSI est un *vector file*, alors que le résultat du traitement du SBAS est un *raster file*. Il est possible de convertir le *raster* en *vector*, mais le temps requis et le volume des données qui en résultent ne sont pas convenables pour une analyse plus approfondie. Par conséquent, le format des données initiales (par défaut) a été utilisé.

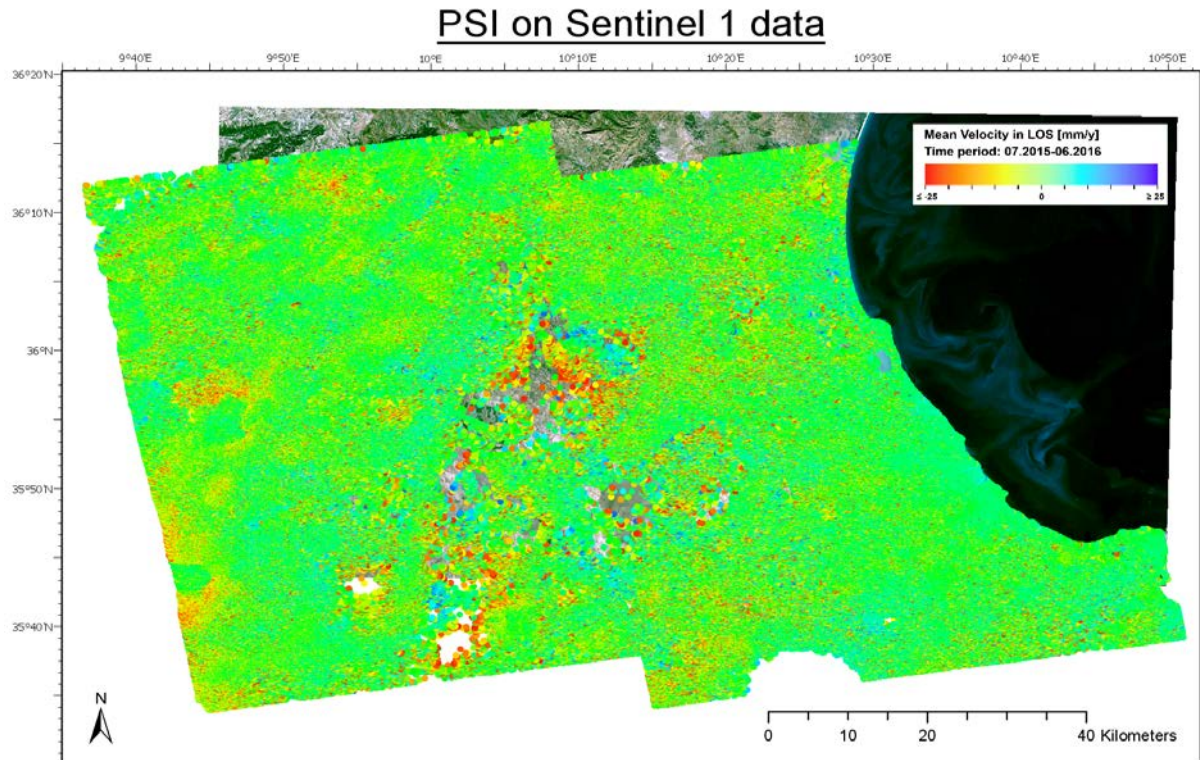


Figure 15: Carte de mouvement du sol pour PSI sur les données Sentinel 1

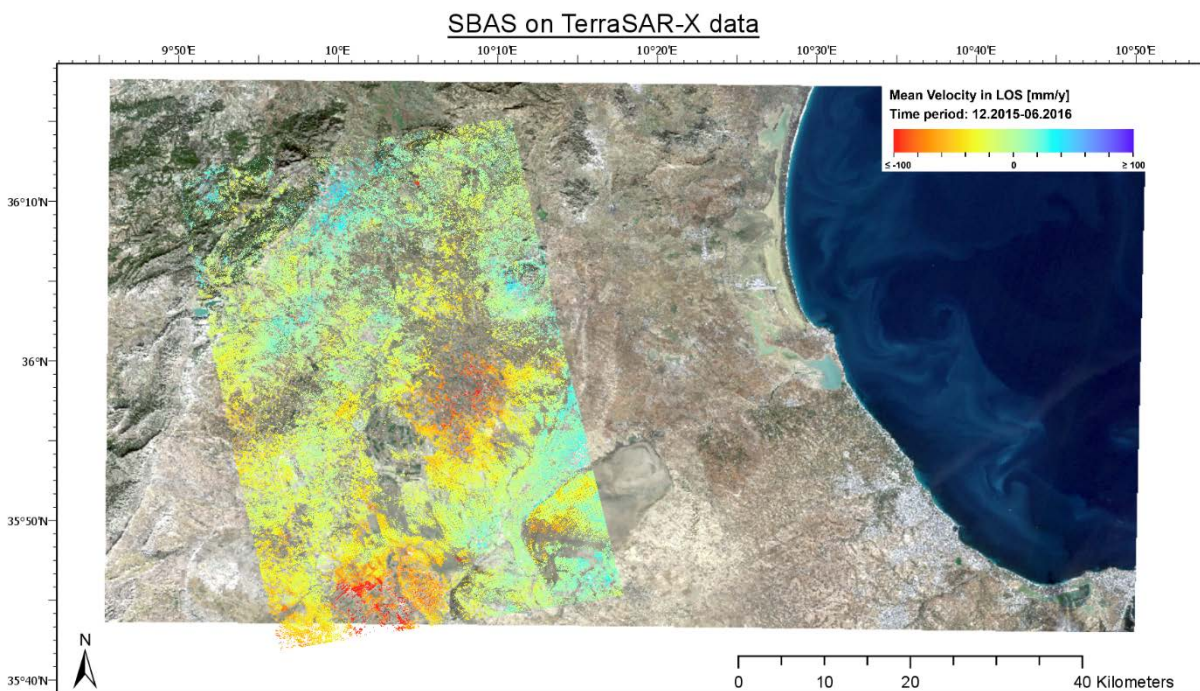


Figure 16: Carte de mouvement du sol SBAS sur les données TerraSAR-X

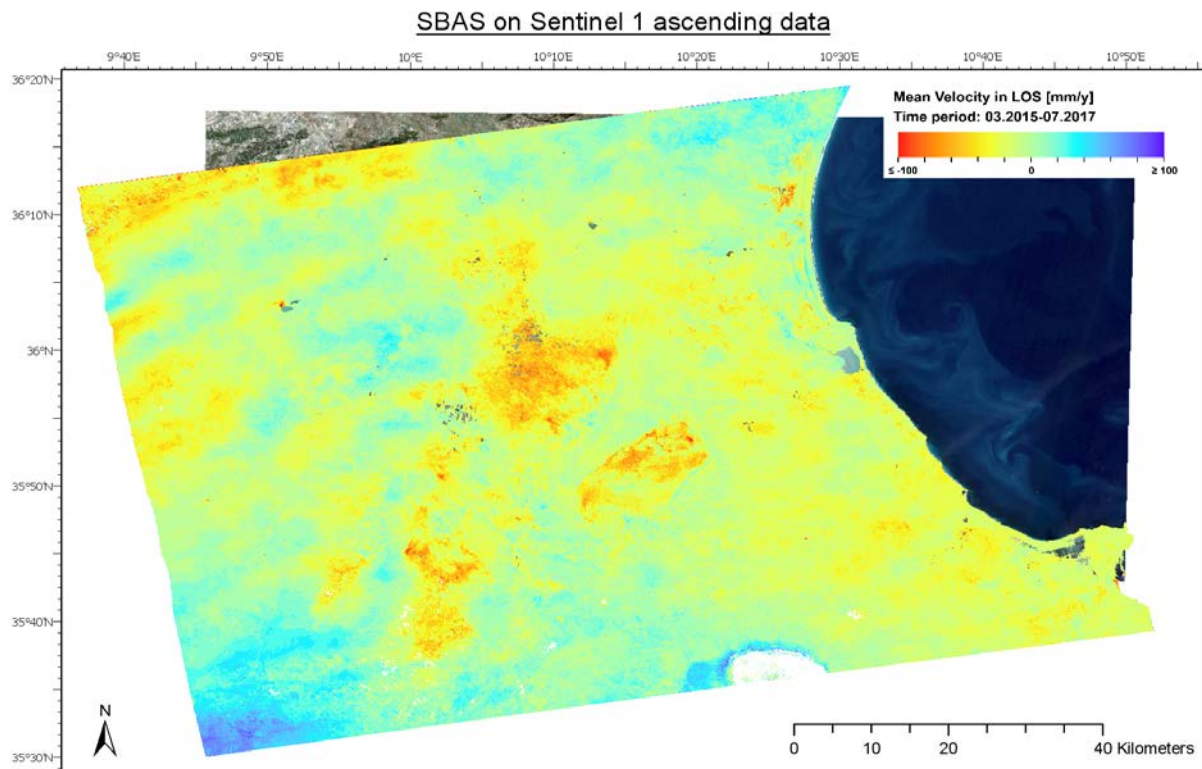


Figure 17: Carte de mouvement du sol pour SBAS sur les données ascending Sentinel 1

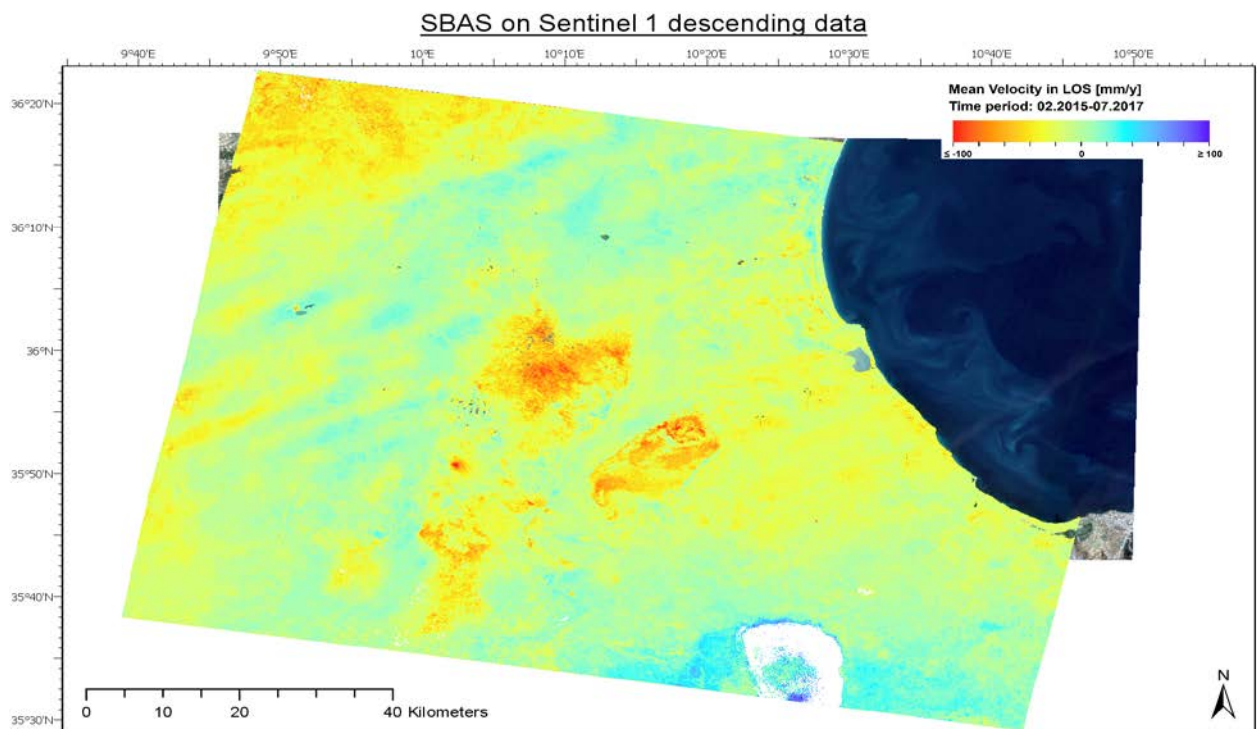


Figure 18: Carte de mouvement du sol pour SBAS sur les données ascending Sentinel 1

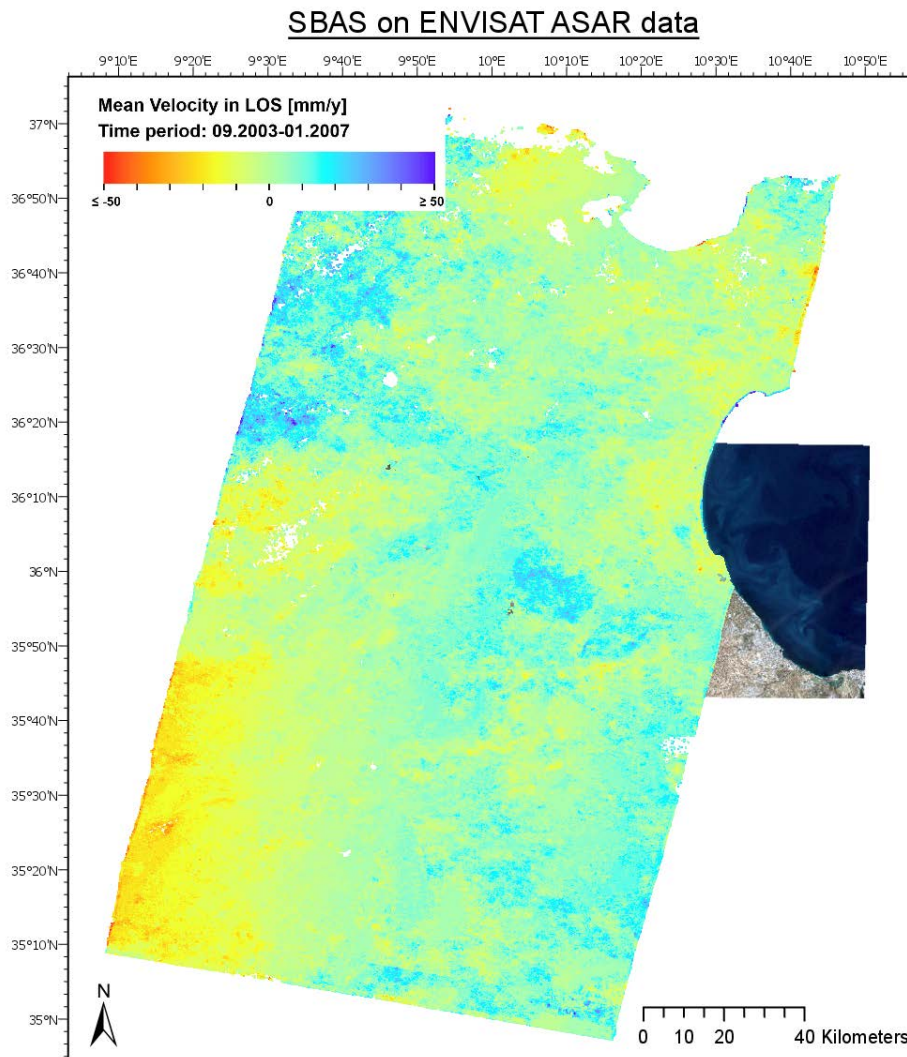


Figure 19: Carte de mouvement du sol pour SBAS sur les données ENVISAT ASAR

Comparaison entre les résultats PSI et SBAS

À première vue, les résultats PSI et SBAS montrent des déformations similaires (Figures 15-19)

Une comparaison directe des résultats PSI et SBAS n'est pas encore possible, et pour cause :

- Des périodes de temps différentes, et donc ni le même intervalle ni le même nombre d'acquisitions, ont été considérées pour le traitement
- Des paramètres différents ont été utilisés pour le traitement

Cependant, une analyse succincte des résultats individuels ainsi qu'une brève comparaison en termes de valeurs de densité et de vélocité PS sont données ici.

Il est évident d'après les Figures 20a et b que la densité PS dans les zones rurales, en particulier dans les zones d'intérêt, est insuffisante en comparaison avec la densité DS obtenue avec la méthodologie SBAS. C'est aussi à cause du seuil de cohérence choisi pour la PSI, beaucoup plus élevé que celui choisi pour SBAS, qui retient moins de *scatterers* pour la PSI que pour le SBAS.

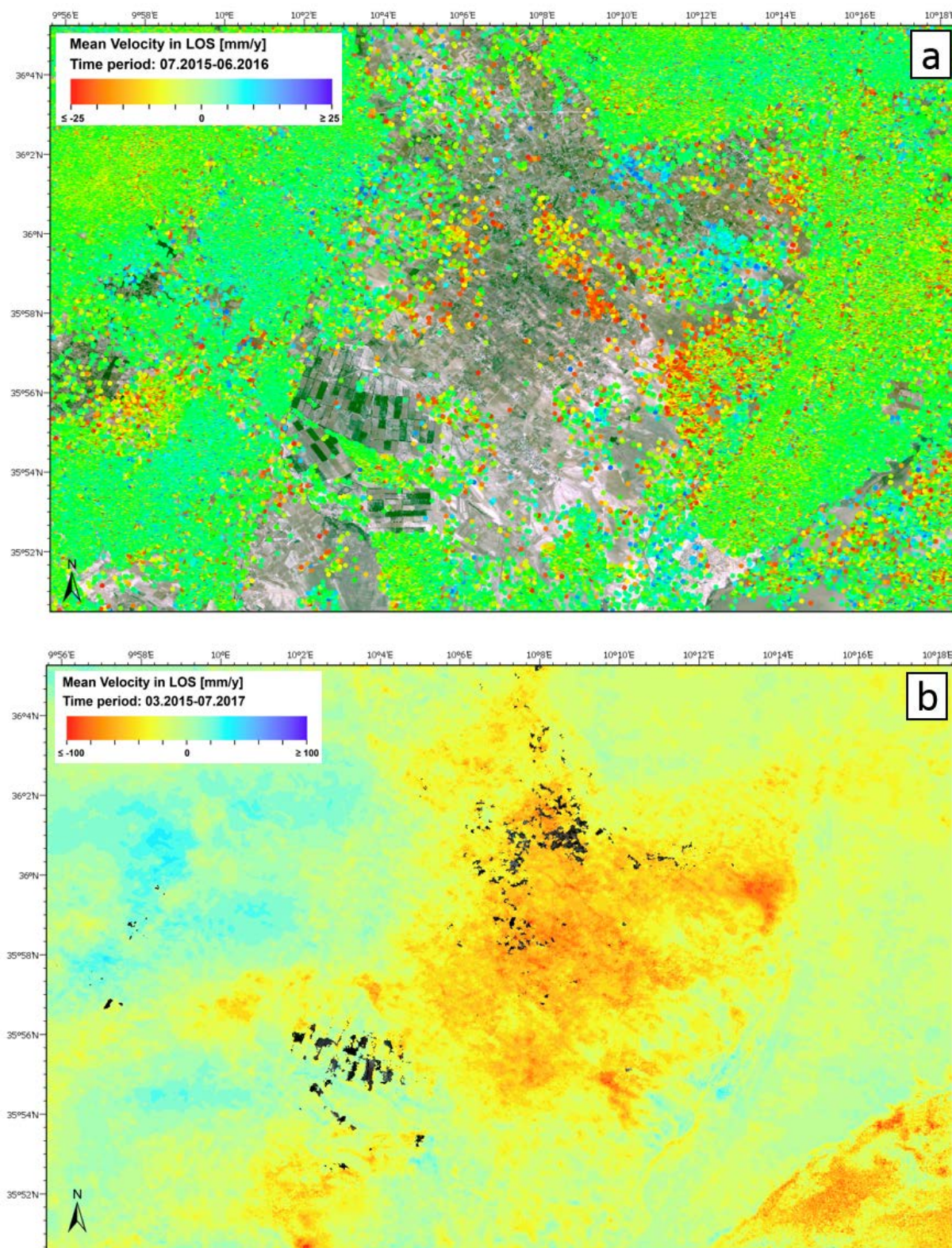


Figure 20: a) Carte de vélocité de traitement par PSI pour la région de Nebhana; b) Carte de vélocité de traitement par SBAS pour la région de Nebhana

Le résultat PS sur la région agricole de Nebhana (Figure 20a) montre des zones d'affaissement au centre, dans l'extrémité nord-est et dans les collines au sud-ouest. Ces endroits sont en corrélation avec les zones des affaissements constatées dans le résultat SBAS. Une zone d'élévation est aussi observable au nord-est de la zone agricole. Cependant,

dans le résultat SBAS cette zone dans le nord est caractérisée par un taux d'affaissement plus modéré jusqu'à une zone stable.

Une autre remarque concernant l'analyse PSI est que les résultats montrent plus de bruit que par SBAS. Cela est dû partiellement au fait que le traitement SBAS effectue un filtrage spatial additionnel, mais aussi parce que davantage de scènes ont été utilisées pour le traitement SBAS, ce qui a donné un résultat plus fluide. En fin de compte, l'intervalle maximum de déplacement était établi pour le traitement PSI à +/- 25mm/a, ce qui est inférieur par rapport à la vitesse observée dans les résultats SBAS. La recommandation serait de retraiter l'analyse PSI en programmant des vitesses d'intervalle de déplacement plus larges (par exemple +/- 100mm/a).

Comparaison entre archives et données actuelles

Une comparaison visuelle du résultat SBAS entre données d'archive Envisat ASAR et les données actuelles Sentinel 1 montre des modèles de déformation opposés pour les deux périodes de temps (Figure 21). Le *coherence threshold* des données Sentinel 1 était programmé à 0,35 pour avoir suffisamment d'informations spatiales dans les zones rurales. Le *coherence threshold* choisi pour les données d'archive est même inférieur (0,1). C'était d'autant plus nécessaire étant donné que les données d'archive montrent une très haute décorrélation temporelle à cause de l'intervalle de temps plus grand entre les acquisitions disponibles. Le niveau inférieur du *product coherence threshold* implique une analyse très attentive des résultats, puisqu'une composante importante de bruit peut persister dans les modèles de déformation observés. Un bruit important peut entraîner des problèmes de déploiement de la phase interférométrique, donnant ainsi des modèles de déformation bruyants ou aberrants au lieu d'une apparence spatiale fluide. Cela est bien observable pour les deux résultats SBAS où le modèle de déformation apparent n'est pas fluide. À ce stade, il est également important de mentionner le nombre très différent des images et l'intervalle de temps entre les scènes SAR utilisées pour le traitement SBAS (voir Annexe 2) : pour le traitement Envisat, uniquement les scènes marquées en gris dans l'Annexe 2 ont été utilisées dans le traitement final pour considérer seulement les interférogrammes les plus cohérents. Ceux-ci représentent au total 14 scènes seulement, au lieu des 86 scènes avec les données Sentinel 1. Généralement, un minimum de 20 scènes est requis pour de telles techniques interférométriques.

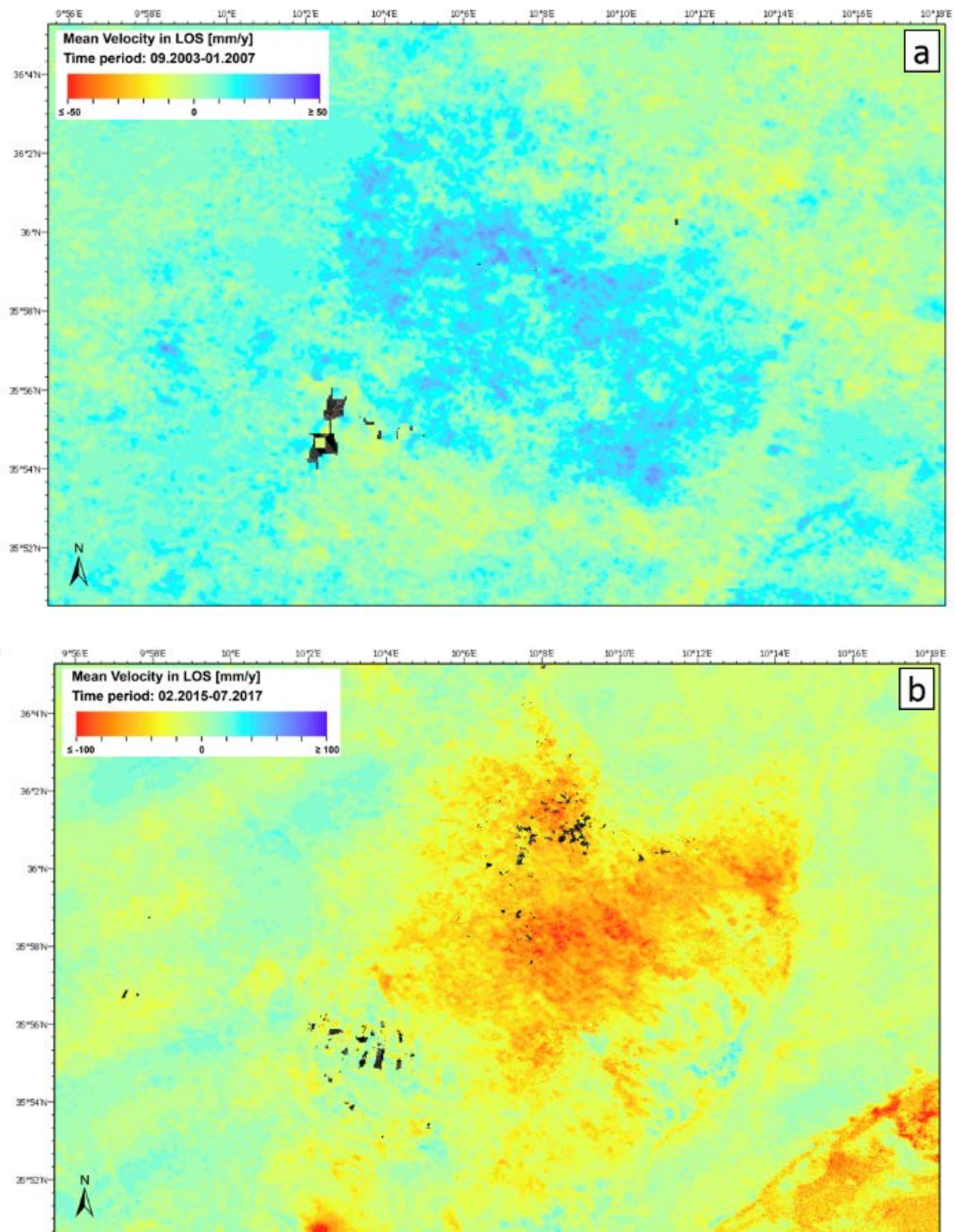


Figure 21: a) Carte de vélocité de traitement par Envisat ASAR SBAS pour la région de Nebhana; b) Carte de vélocité de traitement par Sentinel 1 SBAS pour la région de Nebhana; les deux traitements sont effectués avec des séries de données descendant

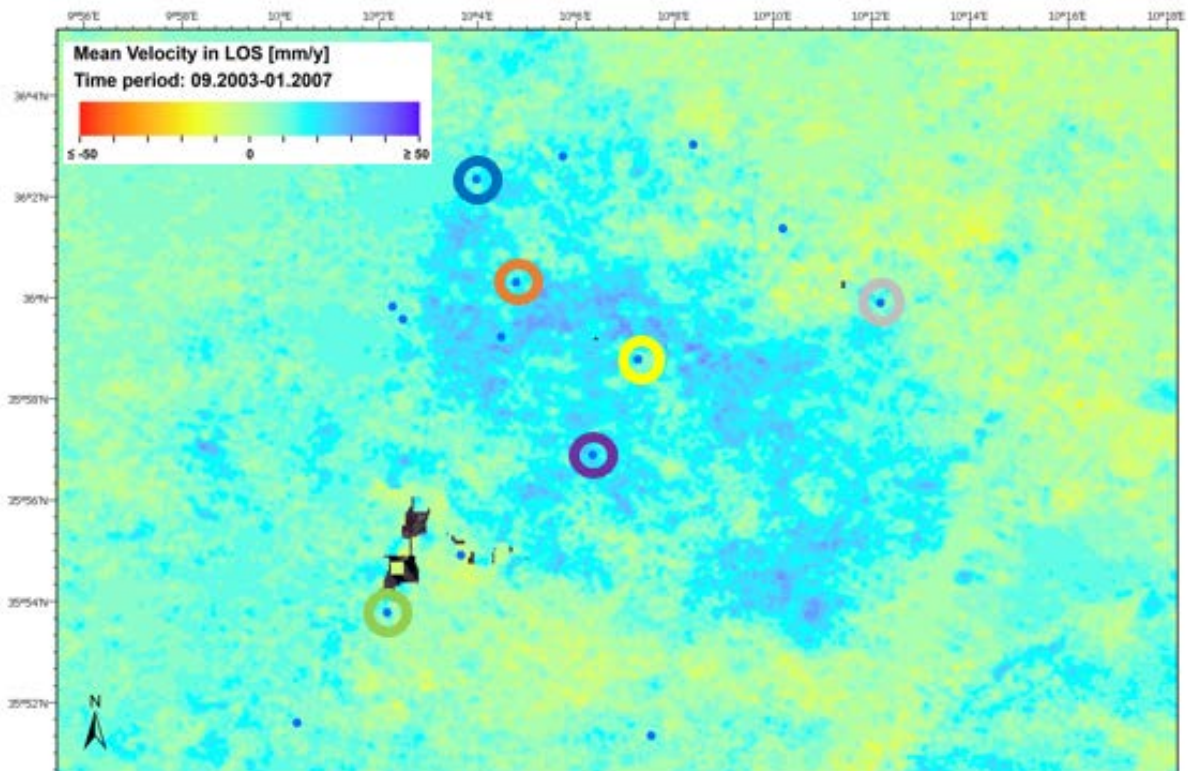


Figure 22: Carte de vitesse de traitement par Envisat ASAR SBAS pour la région de Nebhana et emplacements des piézomètres superposés. Les piézomètres choisis pour interprétation supplémentaire sont encerclés en couleur.

Une analyse plus rapprochée des modèles de déformation spécifiques a été effectuée sur la base des informations disponibles sur le niveau des eaux souterraines. La Figure 22 montre les positions des différents piézomètres dans la région de Nebhana et la Figure 23 montre en codes couleurs l'évolution de leur niveau d'eau souterraine en comparaison avec les valeurs de mouvements du sol correspondants du traitement SBAS pour la période d'acquisition des données d'Envisat ASAR. Les échelles sont choisies pour obtenir une meilleure comparaison avec l'analyse Sentinel 1 de la Figure 20. Une première comparaison avec la Figure 20 montre à la fois pour le niveau d'eau souterraine et pour le mouvement du sol une tendance bien plus stable pendant la période 2003-2007 que pour la période 2015-2017, indiquant une forte chute du niveau d'eau souterraine les dernières années et un mouvement relativement lent lors la décennie précédente. La période considérée pour Envisat ASAR est le double de la période de Sentinel 1, mais pendant cette période de très petites variations du niveau d'eau souterraine ainsi que de très petits taux de mouvement du sol sont observés en comparaison avec ceux observés dans les deux années des acquisitions de Sentinel 1. À première vue, une corrélation entre les niveaux d'eau souterraine et le mouvement du sol n'est pas observable pour les données Envisat ASAR. Les mouvements du sol observés avec le traitement RADAR montrent un petit relèvement au fil de la période 2003-2007, alors que les niveaux des eaux souterraines sont stables sur toute la période, tout en montrant des effets saisonniers de recharge et de déversement. En raison de la quantité inférieure des données RADAR disponibles pour le traitement (14 scènes), les résultats des mouvements du sol ne sont pas assez solides pour faire une quelconque hypothèse fiable. Cependant, lorsqu'on considère dans la Figure 23 Ouled Slimen (en jaune) et Aouitha Oled Neffat (en gris), quelques similitudes dans le comportement des deux courbes pourraient faire l'objet d'une interprétation. Ouled Slimen

comme Aouitha Oled Neffat montre un déversement important de l'eau souterraine – pendant l'été 2005 et l'été 2004 respectivement – suivi par une recharge. Même s'il existe pour ces deux périodes des carences importantes de données, une tendance similaire peut être interprétée dans les valeurs des mouvements du sol qui montrent un mouvement négatif (affaissement) suivi d'un mouvement positif (relèvement) pour les périodes respectives et pour les piézomètres respectifs.

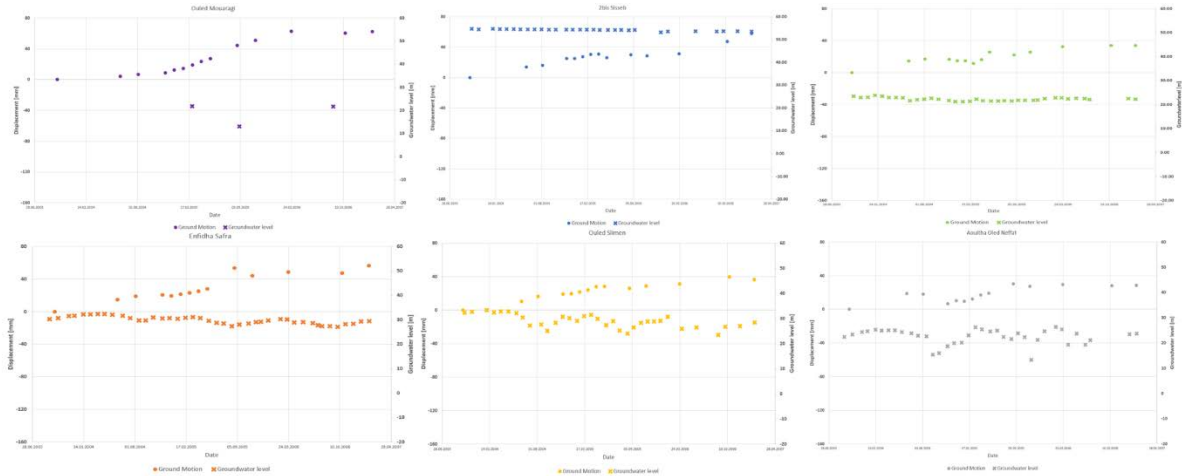
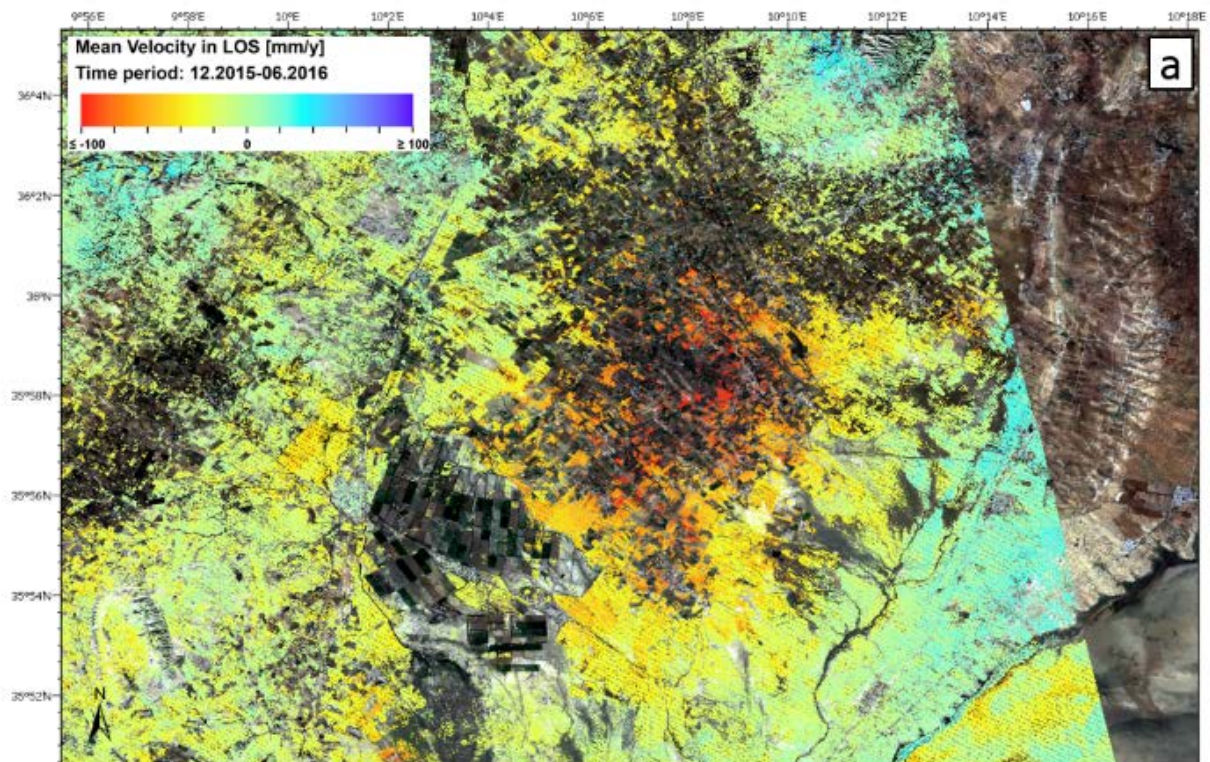


Figure 23: Niveau d'eau souterraine (x) et mouvement correspondant (•) dans différents emplacements de piézomètres choisis



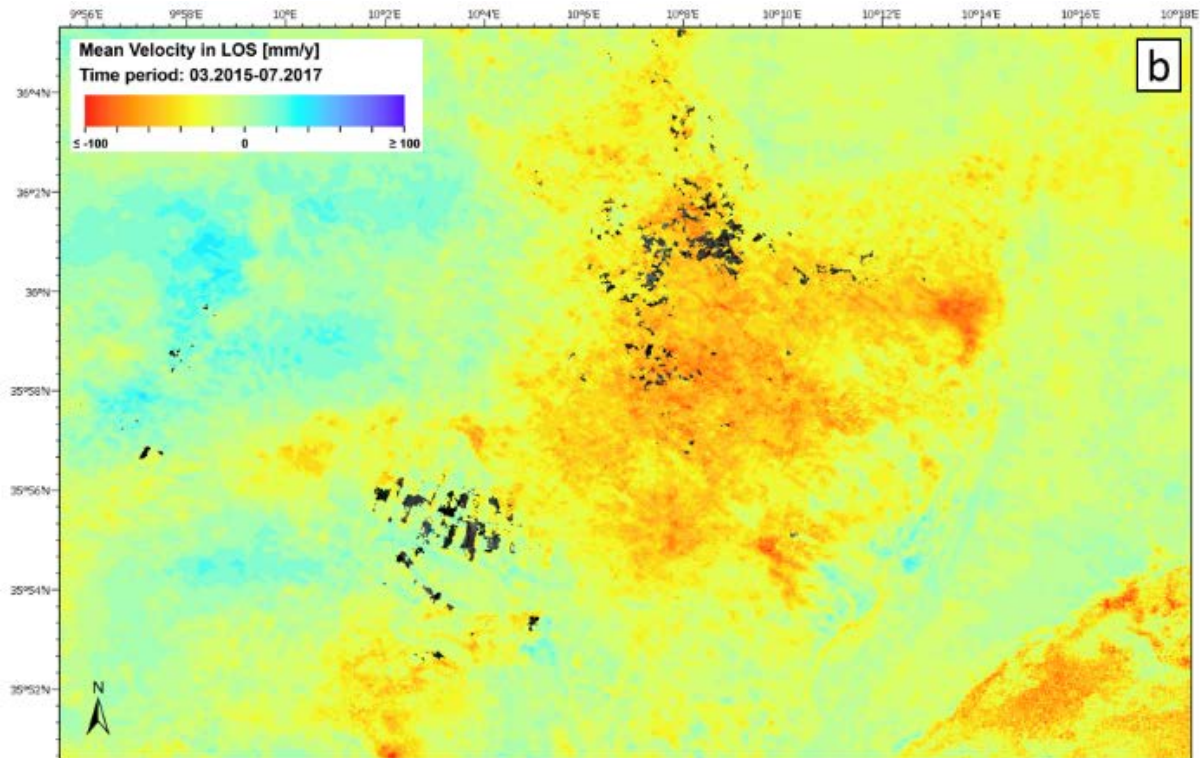


Figure 24: a) Carte de vitesse de traitement TerraSAR-X par SBAS pour la région de Nebhana; b) Carte de vitesse de traitement Sentinel 1 par SBAS pour la région de Nebhana; les deux traitements sont effectués avec des séries de données ascending.

L'influence du seuil de cohérence est bien observable dans la Figure 24 qui montre le résultat du traitement SBAS pour les données TerraSAR-X (Figure 24a) avec un *coherence threshold* de 0,4, et le résultat du traitement SBAS pour les données Sentinel 1 (Figure 24b) avec un *coherence threshold* de 0,35. Plus élevé le *coherence threshold* moins de *scatterers* sont retenus. Et puisque la zone d'intérêt est à vocation agricole qui change au fil du temps au gré des différentes cultures, elle souffre d'une haute décorrélation temporelle, ce qui explique le *coherence threshold* bas nécessaire pour obtenir des informations de déformation dans cette zone.

Interprétation des vitesses

Pour l'interprétation du mouvement du sol, les résultats SBAS des deux directions d'orbite ont été fusionnés pour produire des cartes du mouvement du sol dans la direction verticale et la direction est-ouest (Figure 25). Comme on s'y attendait dans une surface aussi plane que la plaine de Nebhana, la composante principale de vitesse est en direction verticale, avec des vitesses jusqu'à $\geq 100\text{mm/an}$. La composante vitesse en direction de l'est ne montre pas de mouvement remarquable; les bandes apparentes de mouvement en direction de l'ouest étant principalement dues aux artefacts atmosphériques restants. L'interprétation qui suit est par conséquent basée sur la composante mouvement vertical (Figure 25a).

En considération du mouvement vertical, le modèle de vitesse apparent montre un important affaissement sur les zones agricoles, jusqu'à -100mm/an . L'envergure de l'affaissement montre une corrélation spatiale avec l'emplacement de l'aquifère sous-jacent, notamment sur l'extrémité est de l'aquifère (des lignes noires continues dans la Figure 25a). Une autre corrélation spatiale peut être trouvée lorsque l'on combine la carte de vitesse avec une carte

d'occupation du sol. La Figure 25b montre la carte de vélocité superposée avec la carte de l'occupation du sol de ESA CCI LAND COVER – S2 PROTOTYPE LAND COVER 20M MAP OF AFRICA 2016.

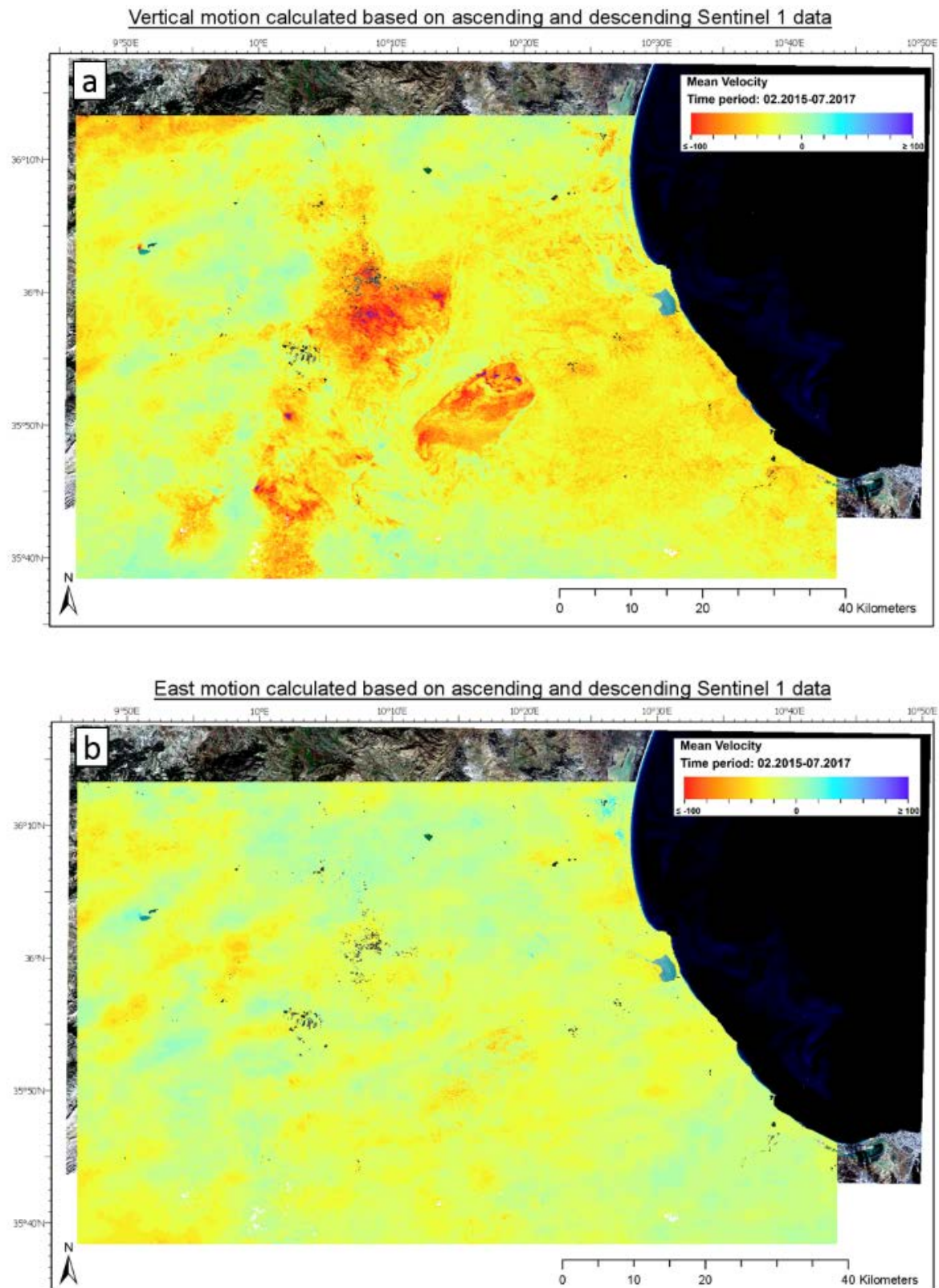
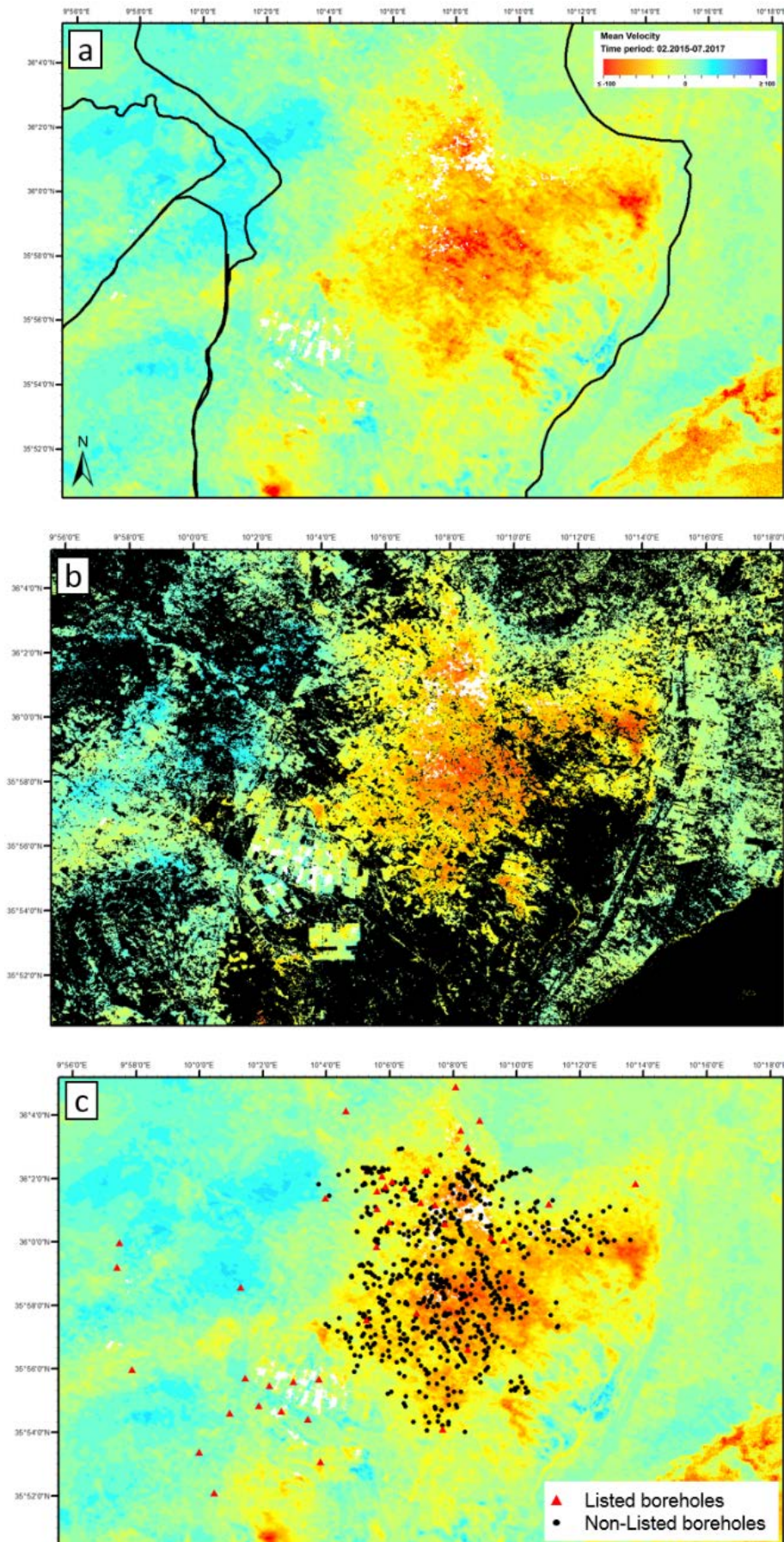


Figure 25: a) *Vélocité verticale de traitement Sentinel 1 par SBAS*; b) *Vélocité vers l'est de traitement Sentinel 1 par SBAS*



Trous de forage déclarés/non déclarés

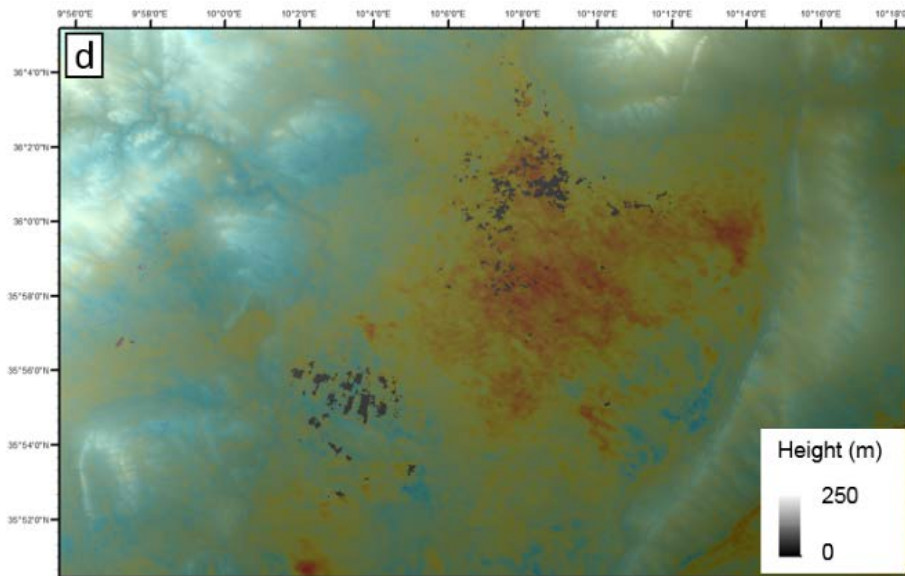
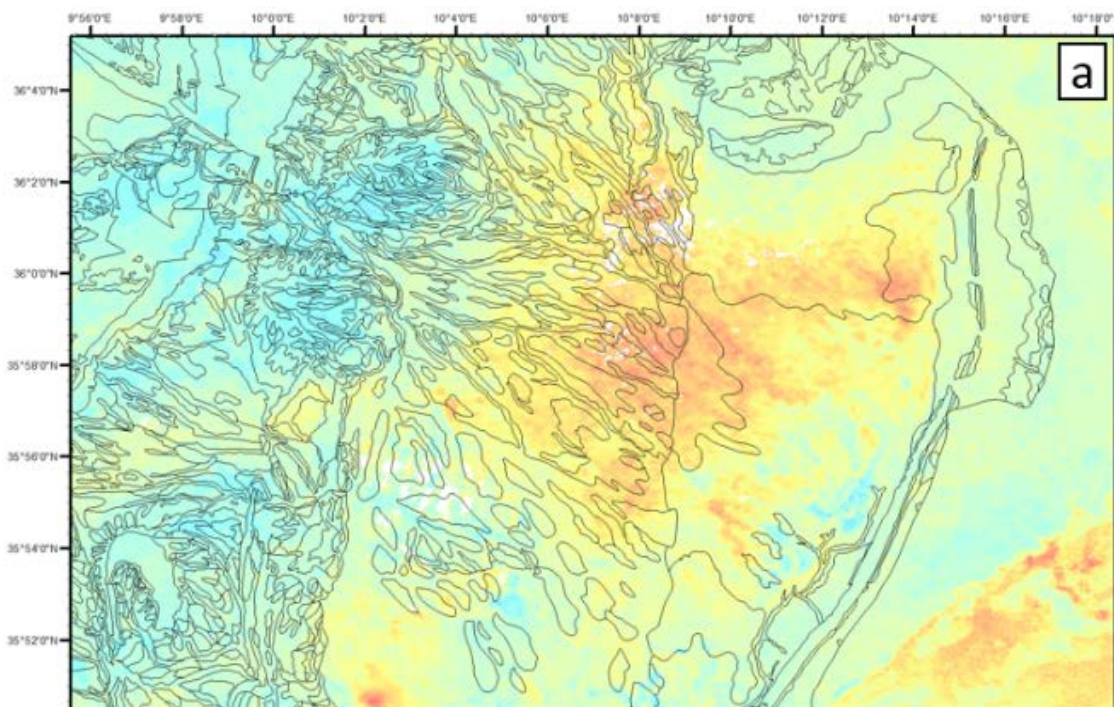
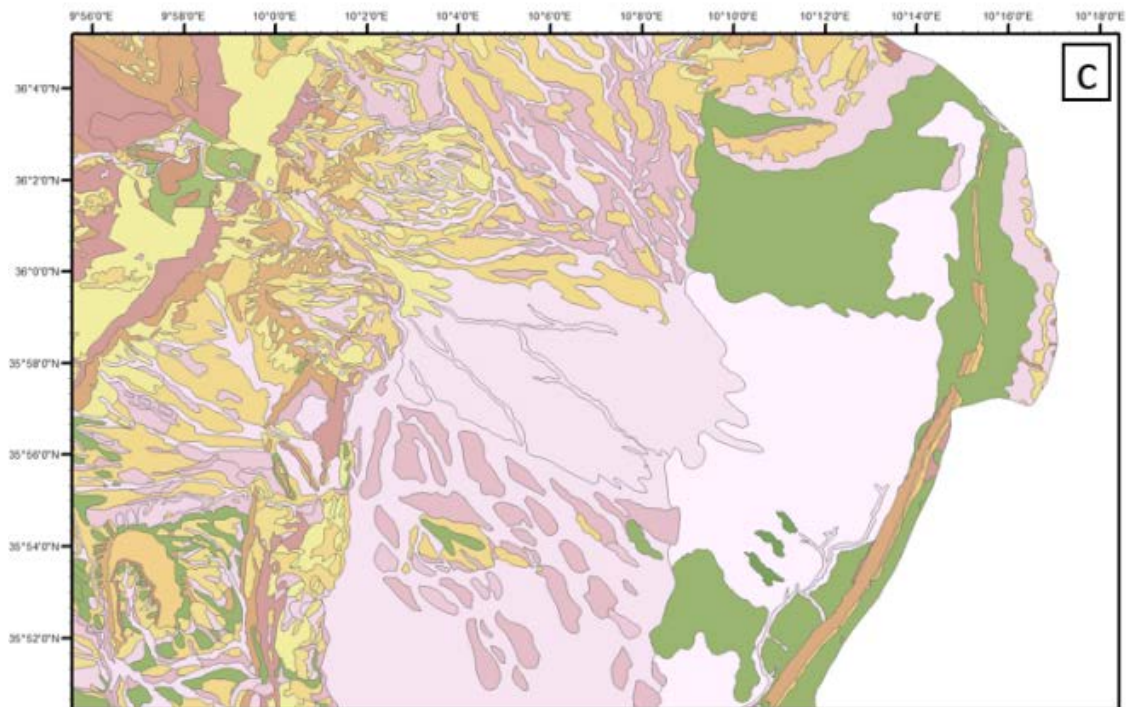
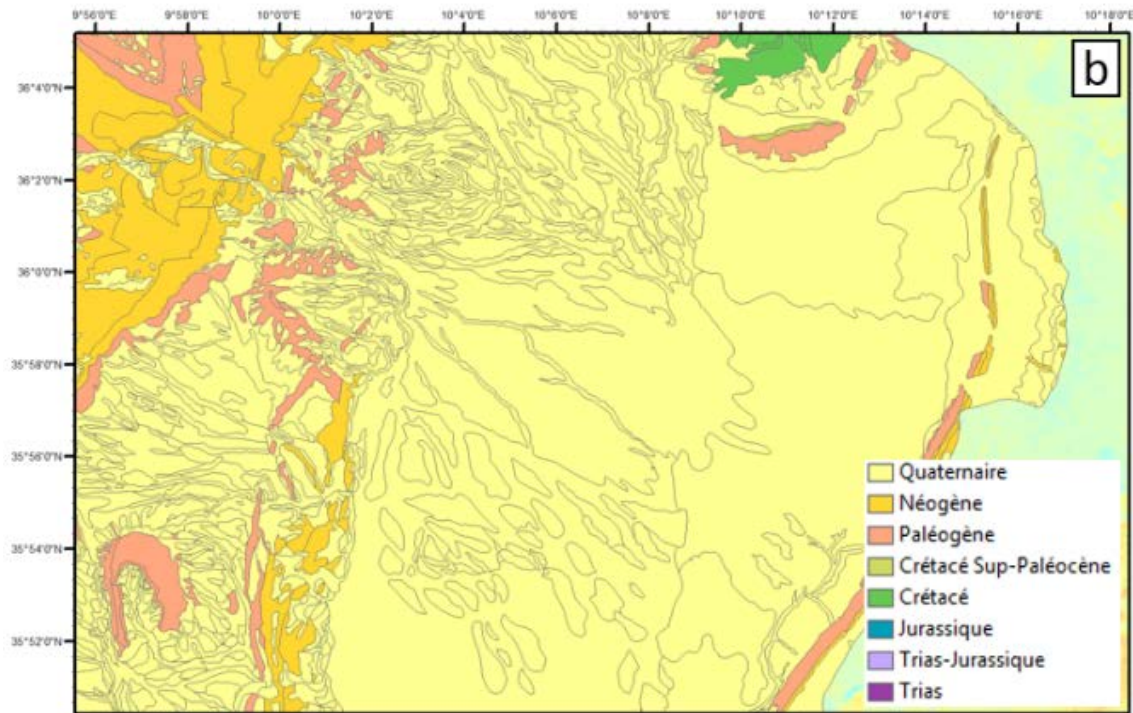


Figure 26: *Vélocité verticale de traitement Sentinel 1 par SBAS superposée avec a) délimitation des aquifères; b) masque des terres cultivées; c) puits des eaux souterraines; d) DEM (TanDEM-X)*

Il est observable que les zones des affaissements les plus forts sont situées au sein de ce masque et semblent suivre sa délimitation. Cette observation tend vers l'indice que cet affaissement est causé par l'exploitation agricole. Cette observation est appuyée par l'analyse de l'emplacement des puits d'eau souterraine. La Figure 26c montre la superposition des différents puits d'eau souterraine avec le champ de vélocité.





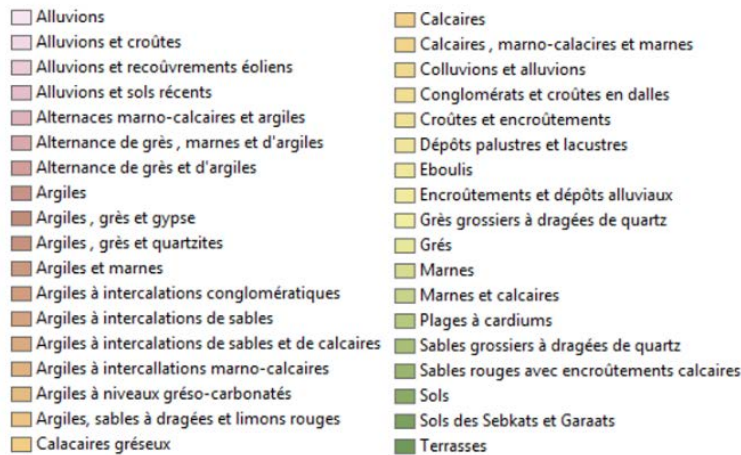


Figure 27: a) Vitesse verticale de traitement Sentinel 1 par SBAS superposée avec a) la délimitation des unités géologiques et lithologiques; b) la carte géologique correspondante; c) la carte lithologique correspondante.

Ces puits sont principalement utilisés pour l'irrigation et l'eau est directement pompée de l'aquifère. Il y a une forte corrélation entre l'emplacement des forages non déclarés et le modèle d'affaissement le plus haut. Au contraire, il n'existe pas de corrélation visible entre l'emplacement des forages déclarés – et contrôlés – et le mouvement du sol (triangles rouges, notamment au sud-ouest de la région). Cela est une indication que les trous non contrôlés peuvent contribuer à une utilisation plus intensive de l'eau souterraine et donc à une surexploitation de l'aquifère sous-jacent.

Une analyse plus poussée de la situation géographique, géologique et lithologique fournit une explication supplémentaire pouvant corroborer l'indication d'une surexploitation de l'aquifère. À partir de la Figure 26d, le plus fort affaissement est observé sur une zone relativement plane. De l'affaissement est aussi observable sur les collines dans la partie ouest de la zone. Ces flancs de colline sont plus hauts mais restent de surface plane et exploités dans l'agriculture, notamment l'arboriculture. La Figure 27 montre que l'affaissement principal se produit sur un relativement jeune sol (quaternaire, Figure 27b). Le sol est composé d'alluvions (Figure 27c). Ces sédiments ont généralement une grande compressibilité et sont par conséquent susceptibles de subir une grande compaction du sol, notamment à travers le prélèvement de l'eau des aquifères sous-jacents, ce qui pourrait expliquer le résultat en affaissement de la couche supérieure du sol.

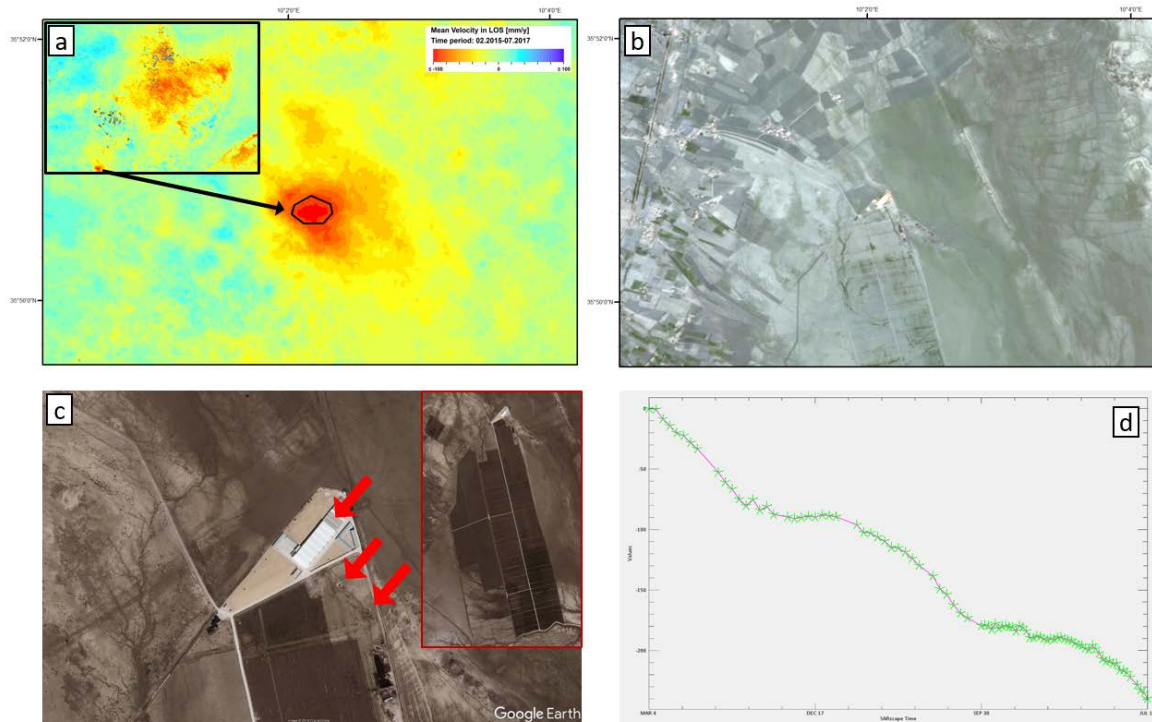


Figure 28: a) Zoom sur traitement Sentinel 1 par SBAS; b) image satellite correspondante; c) construction au centre du cluster de déformation; d) séries chronologiques correspondantes de l'affaissement principal

Le zoom sur certaines zones rend observables des clusters de déformation locaux et à petite échelle. La Figure 28a montre un de ces clusters situé au sud-ouest de l'étendu initial de l'image. La comparaison avec les données optiques montre une forte corrélation entre l'emplacement de l'affaissement conique et la position d'une construction (Figure 28a et 28b). Cette construction est supposée appartenir à une très importante plantation d'oliviers située au sud de la construction. L'examen de plus près de la construction et son entourage immédiat révèle l'existence possible de deux puits d'eau souterraine (flèches rouges en bas de la figure 28c). En outre, et à travers l'historiques des images de Google Earth (Figure 29), l'on constate que ces puits ont été réalisés récemment (entre 2010 et 2011) ainsi que la construction. La Figure 28d montre les séries chronologiques des mouvements du sol de la zone de l'affaissement principal (montré en contour noir dans la Figure 28a), commençant en mars 2015 et prenant fin en juillet 2017. En plus de l'affaissement évident (environ 100mm/a), un petit effet saisonnier est reconnaissable, ce qui indique un petit relèvement pendant les mois de l'hiver, ce qui peut correspondre à une recharge de l'aquifère. Cela doit faire l'objet d'analyse plus poussée en considérant notamment les données des précipitations météorologiques. Et donc à la fois la surexploitation de l'eau souterraine (réduction du volume de l'aquifère) et la construction du bâtiment, de moindre importance, entraînent la compaction du sol qui peut causer le processus d'affaissement ici.

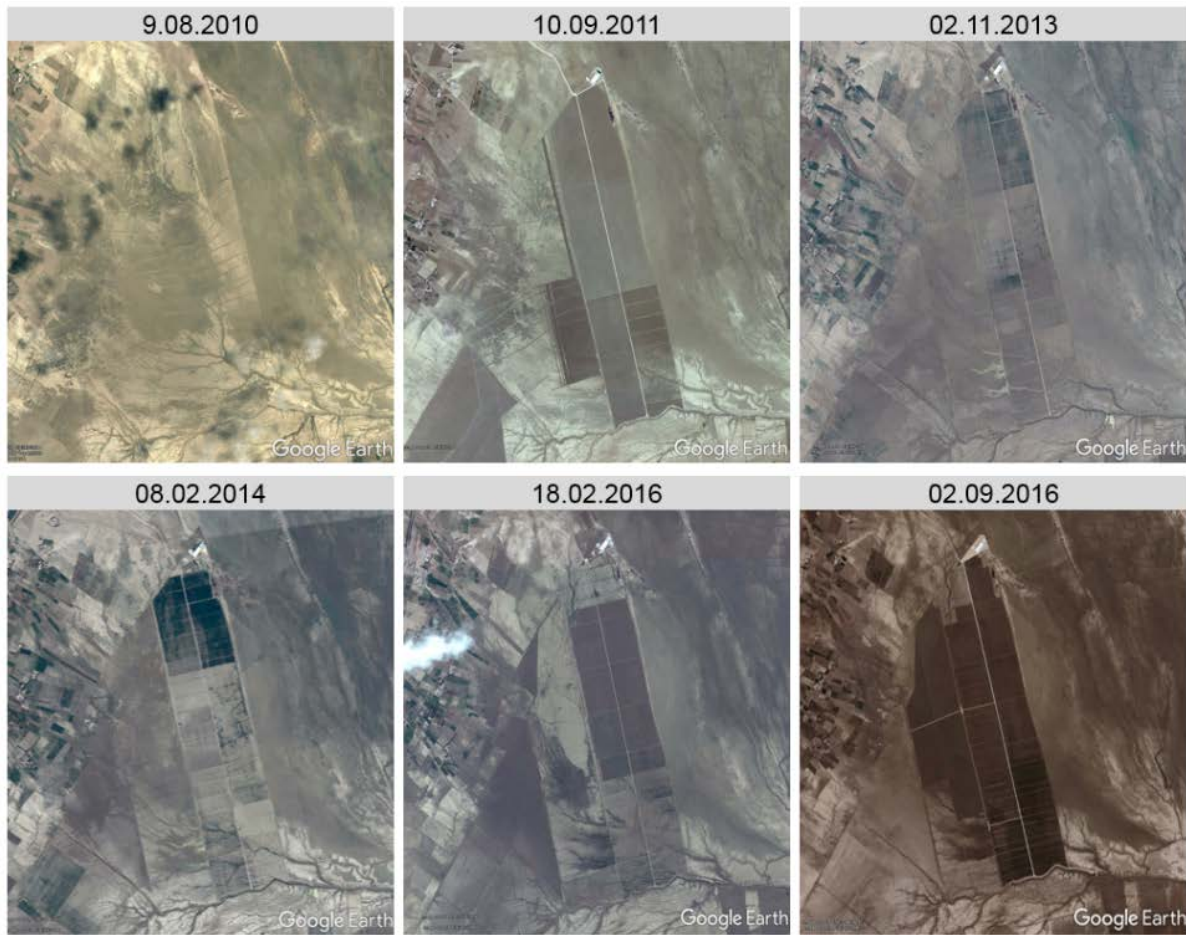
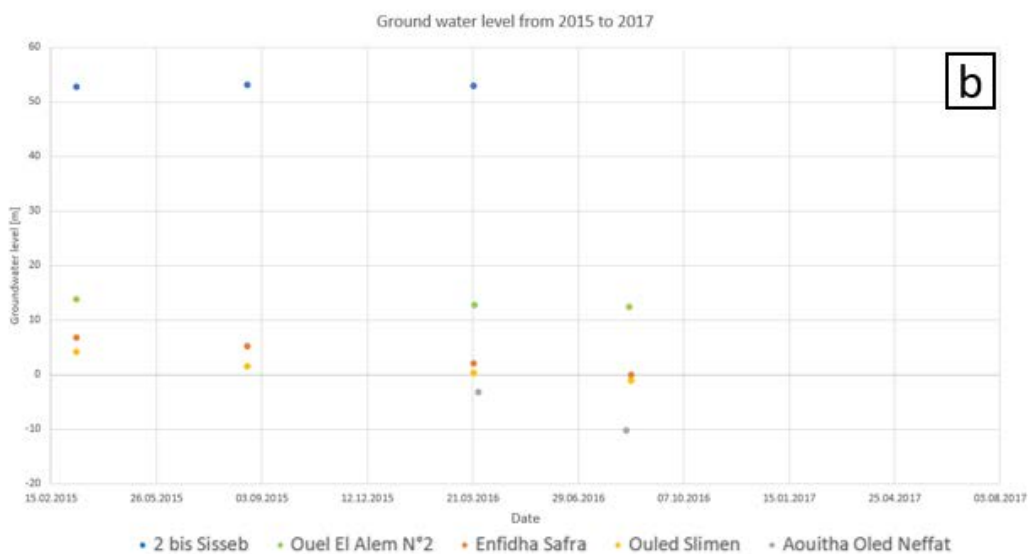
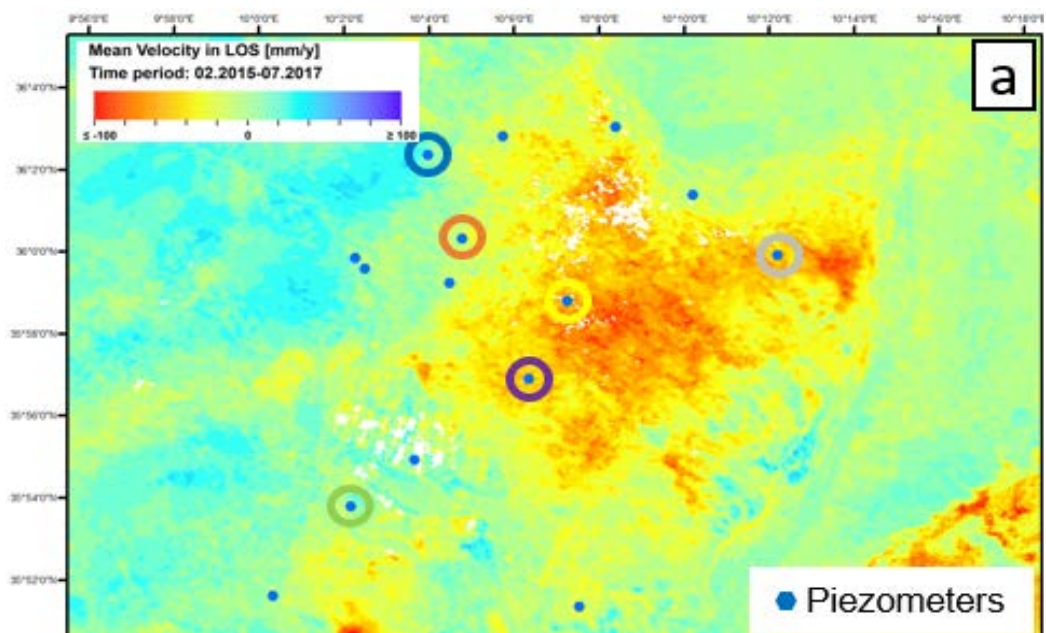


Figure 29: Imagerie optique multi-temporelle (Google Earth 2018)

La Figure 30 montre l'évolution du niveau d'eau souterraine à des emplacements spécifiques de piézomètres et sur les limites de la zone de l'affaissement principal. La Figure 30a montre l'emplacement géographique des piézomètres. La Figure 30b représente pour les piézomètres choisis l'évolution du niveau d'eau souterraine pendant la période des acquisitions RADAR (2015-2017), et la Figure 30c la même évolution depuis 1973. Malheureusement, aucune information sur le niveau d'eau souterraine n'est disponible après 2016 ce qui fait que seulement une tendance linéaire peut être supposée pour 2017. La Figure 30d montre le mouvement du sol correspondant à chaque piézomètre choisi. Les piézomètres choisis sont encadrés dans la Figure 30a et le même codage couleur est utilisé pour toutes les sous-figures. Depuis 2008, seulement deux mesures du niveau d'eau souterraine par an sont effectuées aux piézomètres, en comparaison avec les mesures mensuelles qui se faisaient auparavant. En outre, les mesures sont disponibles jusqu'à la première moitié de 2016, ce qui explique la quantité inférieure des mesures dans la Figure 30b. Pour le piézomètre de Ouled Mouaragi (en violet), aucune mesure ne sont disponibles depuis 2015. L'interprétation qui suit se base en conséquence principalement sur l'hypothèse que la tendance des niveaux d'eau souterraine depuis 1973 s'étend approximativement d'une manière linéaire pendant la période d'observation par RADAR. Il semble y avoir une corrélation entre les niveaux d'eau souterraine observés et le mouvement du sol déterminé. Au niveau des piézomètres de Ouled Slimen (en jaune), de Ouled Mouaragi (en violet) et de Aouitha Oled Neffat (en gris), un fort affaissement est observé (-90 jusqu'à -150mm sur la période d'observation par satellite). L'on observe aussi une forte baisse des niveaux d'eau souterraine (une interpolation approximative de la Figure 30b et c pourrait montrer une baisse de 10m jusqu'à plus de 20m pour la même période). Au niveau du piézomètre 2 bis Sisseb (en bleu), le niveau d'eau souterraine est constant pendant la

période d'observation (Figure 30b), ce qui a une corrélation avec le mouvement du sol observé (Figure 30d). Dans ce cas, les informations temporellement plus denses du mouvement du sol montrent même un léger relèvement pendant l'hiver 2016/2017 et cela est dû peut-être à la recharge de l'aquifère par des précipitations. Cette recharge est aussi visible au niveau des piézomètres de Ouled Slimen (en jaune) et de Aouitha Oled Neffat (en gris). Pour le piézomètre de Ouel El Alem n°2 (en vert), la baisse du niveau d'eau souterraine est modérée (Figure 30b et c), et aussi le mouvement du sol observé (Figure 30d). Finalement, le niveau d'eau souterraine au piézomètre Enfigha Safra (en orange) montre une forte tendance baissière depuis 1996. Le mouvement du sol correspondant montre plutôt un sol stable de 2015 à 2016, et l'affaissement ne devient évident que vers la fin de 2016 / début 2017. Par conséquent, une certaine corrélation existe entre le mouvement du sol observé et les niveaux d'eau souterraine mesurés. Cependant, cette corrélation n'est pas directement proportionnelle, du fait qu'elle dépend de plusieurs autres facteurs comme par exemple les propriétés du sol et la profondeur de l'aquifère.



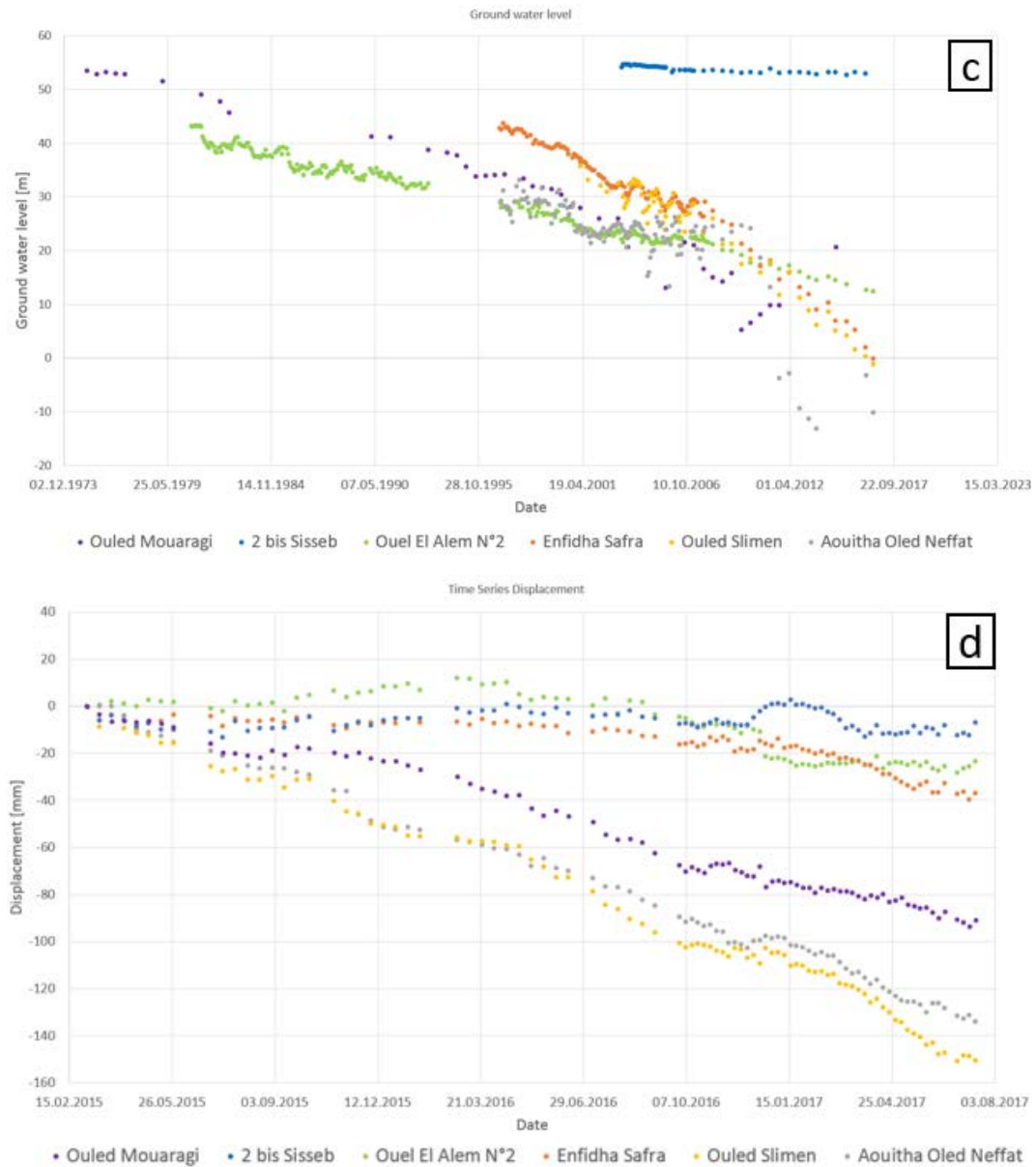


Figure 30: a) Emplacement géographique des piézomètres traitement de Sentinel 1 par SBAS; b) évolution du niveau des eaux souterraines pour les piézomètres choisis (2015-2017); c) évolution du niveau des eaux souterraines pour les piézomètres choisis (depuis 1973); d) mouvement du sol correspondant

Toutes ces cartes renseignent sur une forte corrélation entre l'affaissement observé et une possible surexploitation de l'aquifère sous-jacent. Par ailleurs, toutes ces explications doivent être traitées avec beaucoup de prudence du fait que les résultats InSAR sont hautement affectés par la différence de l'humidité du sol particulièrement présente dans les zones agricoles. Et donc, le modèle de mouvement observé peut en fait correspondre à un affaissement, mais cet affaissement peut ne pas être aussi fort qu'il est montré, ou les modèles de vélocité locaux peuvent être causés par le bruit ou autres paramètres de végétation dont les différences de phases, non causés par le mouvement du sol.

Plus de données in-situ sont par conséquent nécessaires pour corroborer cette interprétation.

3.4 Transfert au DSS

Un système d'aide à la décision (DSS) a été développé pour le système hydrique de Nebhana dans le cadre de ce projet. Le DSS considère tous les aspects en relation au cycle de l'eau comme l'approvisionnement en eau potable, le ruissellement de surface ou les impacts du système hydrogéologique, et ce pour faciliter le travail quotidien du preneur de décision. Il a été développé avec le système modèle WEAP (*Water Evaluation And Planning*) qui est un outil intégré de planification des ressources hydriques, notamment pour les eaux de surface. Le système WEAP est lié au système de modélisation d'eau souterraine MODFLOW pour décrire la dynamique de l'eau souterraine.

En plus de l'estimation globale du captage des eaux souterraines, l'approche de classification, décrite en chapitre 3.2, est utilisée pour le DSS.

3.4.1 Données

L'un des paramètres importants à entrer dans le système est l'occupation du sol et les classes des cultures pour le calcul de la consommation d'eau. L'objectif est de faire une simulation des besoins d'irrigation des cultures sur la base de leur évapotranspiration de référence et, in fine, calculer le captage des eaux souterraines.

Les mêmes données sont utilisées pour la classification comme il est décrit au chapitre 3.2. L'intégration de l'analyse InSAR a été discutée au stade de projet (par exemple les données absolues du mouvement du sol), mais les résultats de l'analyse InSAR ne sont pas encore implémentés dans le DSS.

3.4.2 Méthodologie

Cinq macro-classes ont été identifiées pour la classification de l'occupation du sol à travers le traitement des données optiques (chapitre 3.2) : céréales, fourrages, arbres, légumes et sol nu. Étant donné que l'objectif du DSS est de décrire la demande en eau en plus de détails, ces cinq classes sont modifiées. Ainsi, la classe « arbres » est divisée en oliviers, agrumes et autres arbres (surtout le grenadier et l'abricotier). Les oliviers peuvent avoir une moindre consommation d'eau en comparaison avec les agrumes sur l'année. C'est également le cas pour les agrumes en comparaison avec les autres arbres. Alors, pour les trois classes d'arbres (oliviers, agrumes et autres), les trois classes de cultures annuelles (céréales, fourrages et légumes) et la classe sol nu, l'on calcule l'occupation du sol avec ses classes de type de culture correspondantes sur la base de l'approche de la classification développée (chapitre 3.2) à la fois pour la saison d'été et la saison d'hiver (sauf pour les céréales pendant la saison d'été).

Les résultats de l'approche de classification montrent une faible précision et une confusion pour les classes de culture oliviers et sol nu. Ces classes ne peuvent pas être clairement distinguées dans plusieurs cas. Il existe toujours un intervalle de sol nu ou parfois de prairie entre les oliviers, ce qui entraîne une réflectance mixte de sol nu et d'olivier. C'est également le cas pour le sol nu et la petite couverture végétale comme l'herbe. Et pour faire face à ce problème et améliorer la précision, l'on a réalisé une digitalisation manuelle des oliviers dans la zone d'étude sur la base des images satellite sur Google Earth. Cette information est considérée la plus fiable en ce qui concerne les oliviers, et la classification des cultures est calculée en utilisant cette couche digitalisée (Figure 31).



Figure 31: Couche digitalisée d'oliviers

L'agriculture pluviale est pratiquée dans la région de Kairouan, notamment pour les oliviers. Les études et le travail sur le terrain montrent qu'environ 90% des oliviers dans la zone d'étude dépendent des eaux de pluie. Et puisque l'agriculture pluviale ne requiert pas d'eau d'irrigation, cet aspect important est considéré dans le DSS. D'où la division de la classe oliviers en type non-irrigué et type irrigué (Tableau 7).

Tableau 7: Classes d'utilisation du sol pour le DSS

Oliviers non-irrigués	Agrumes	Céréales	Légumes
Oliviers irrigués	Autres arbres	Plantes fourragères	Sol nu

La consommation d'eau et les besoins d'irrigation de culture correspondants sont ensuite calculés en utilisant l'outil d'extension MABIA du système modèle WEAP. La méthode MABIA utilise la *dual crop coefficient method* comme elle est décrite dans le *Irrigation and Drainage Paper No. 56* de la FAO, où la valeur K_c est divisée en *basal crop coefficient* K_{cb} , et une autre composante, K_e , représentant l'évaporation sur la surface du sol. L'on considère également les informations disponibles sur le sol provenant du travail sur le terrain.

La Figure 32 représente une illustration schématique des composantes du DSS.

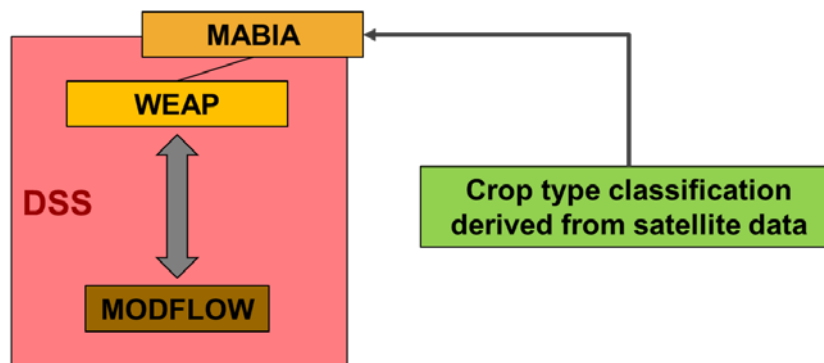


Figure 32: Illustration schématique des composantes du DSS

3.4.3 Résultats

Sans utiliser la couche digitalisée des oliviers, les classifications par type de culture pour les sept classes lors de la saison hivernale montre une précision globale de 70,6% et pour les six classes pendant l'été de 80,2%. La précision relativement basse, notamment pendant l'hiver, est essentiellement liée à la confusion entre les oliviers et le sol nu. Aussi, des confusions plus importantes peuvent être observées en comparant toutes les classes.

La Figure 33 montre la carte qui résulte de la classification par type de culture pendant la saison d'été pour la zone d'étude où le DSS intègre la couche digitalisée de l'olivier (sans différenciation entre oliviers irrigués ou non irrigués). Lorsqu'on utilise la couche d'oliviers comme masque, la précision globale peut être considérablement améliorée pour atteindre 89,4%.

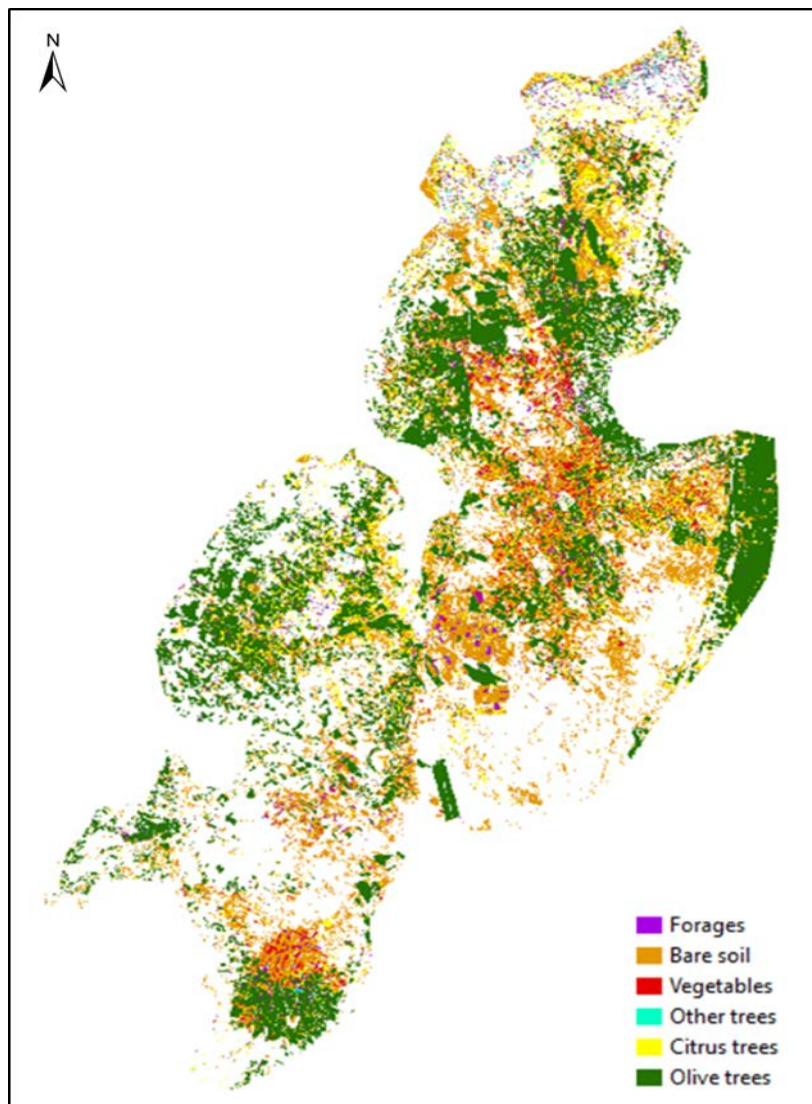


Figure 33: Classification par type de culture pour le DSS

Les résultats du DSS et les besoins en eau estimés par culture sont présentés dans le rapport de projet par Nouiri (2018).

4. Algérie

En Algérie, la zone d'étude est la plaine de Remila-F'kirina située dans la partie est du pays. Comme pour la Tunisie et le Maroc, l'étude se penche sur la quantification des volumes d'eau souterraine à usage agricole et vise à renforcer la sensibilisation au sujet de la surexploitation des systèmes d'aquifères. En outre, les autorités nationales en charge de l'eau sont hautement intéressées par l'établissement d'une base de données sur les points de prélèvement des eaux souterraines.

4.1 Inventaire des points de prélèvement des eaux souterraines

Dans la zone d'étude il existe un inventaire des points de prélèvement des eaux souterraines fourni par les autorités nationales de l'eau en 2016. Cet inventaire qui contient des informations sur les emplacements des puits et forages est obsolète et incorrect dans plusieurs cas. D'où la nécessité d'une mise à jour de cet inventaire.

Dans le but d'établir une base de données nouvelle et fiable des points de prélèvement, les autorités locales relevant des ministères de l'Agriculture et des Eaux (DSA et DRE) en coopération avec l'Agence du Bassin Hydrographique Constantinois - Seybousse - Mellegue (ABH CSM) ont réalisé plusieurs semaines de travail sur le terrain dans la région pendant la dernière moitié de 2017. Elles ont collecté les coordonnées géographiques des points de prélèvement avec, dans la mesure du possible, des informations supplémentaires sur les taux et volumes de pompage ainsi que sur la surface irriguée sur la base des déclarations des agricultures.

Le travail de terrain a été validé et discuté par la suite avec les partenaires du projet concernés lors d'une session de travail. Le résultat du travail sur le terrain ainsi que de la rencontre s'est décliné en une base de données de l'emplacement des points de prélèvement des eaux souterraines, fiable, mise à jour et partagées avec les autorités en charge de l'eau en Algérie par l'OSS.

Pour l'étape suivante, il est envisagé de comparer les emplacements des puits et des forages avec les zones irriguées qui peuvent être identifiées par les données satellites. Une superposition de ces deux couches permettra une localisation des points de prélèvement non déclarés ou non inventoriés.

4.2 Traitement optique

Cette partie présente la méthodologie développée pour la classification de l'occupation du sol et la détermination subséquente de la consommation d'eau des cultures pour l'Algérie. Elle est basée sur la même méthodologie appliquée en Tunisie, avec de légères différences en raison des objectifs finaux différents qui ont été identifiés pendant la session de formation qui a eu lieu au siège du BGR à Hanover en janvier et février 2018.

4.2.1 Données

Du moment que la méthodologie a été adaptée pendant la formation en tenant compte de la qualité des données de référence disponibles, des séries de données différentes ont été utilisées. Pour l'analyse des profils NDVI, l'on a considéré une année toute entière (2017). Pour la classification, l'hiver 2016/2017 a été considéré d'une manière plus détaillée.

Le Tableau 8 montre les séries de données retenues. Les cases en gris représentent les données qui ont été prises en considération pour la classification de la saison d'hiver.

Tableau 8: Données Sentinel-2 acquises pour le traitement

Sentinel-2
16.02.2017
28.03.2017
17.04.2017
17.05.2017
26.06.2017
11.07.2017
05.08.2017
14.09.2017
14.10.2017
08.11.2017
08.12.2017

Les données du terrain ont été acquises par les autorités locales en charge de l'eau pendant la dernière moitié de 2017 (chapitre 4.1). Elles consistent essentiellement en un inventaire des puits et des forages et, le cas échéant, le taux de pompage ou le volume dédié. Il n'est cependant pas possible d'affecter les puits aux zones agricoles correspondantes dans plusieurs cas. Ce qui entraîne la nécessité d'acquérir à nouveau plusieurs données de référence pour le traitement de télédétection pendant la formation. Uniquement les données de référence fiables ont été utilisées et de nouveaux domaines de formation ont été déterminés par l'usage d'une imagerie limitée à plus haute résolution de Google Earth (plantations d'arbres et terrain nu).

4.2.2 Méthodologie

Les étapes de travail pour le traitement de la zone d'étude en Algérie est présenté dans la Figure 25. Trois principaux objectifs ont été identifiés et formulés pendant la session de formation :

1. Déterminer la consommation en eau dans la zone pilote
2. Déterminer les parcelles irriguées qui ne sont pas inventoriées
3. Déterminer la consommation en eau dans les parcelles non-inventoriées

Les différentes étapes nécessaires pour réaliser ces objectifs sont représentées en codage-couleur dans la Figure 34. Jusqu'à la ligne pointillée, les étapes de travail correspondent à ceux de la Tunisie et ont été partiellement traitées pendant la formation. Les étapes restantes doivent encore être réalisées, mais sont expliquées succinctement ici. Par l'usage des données FAO et l'outil Excel développé, les besoins en eau théoriques ajustés ont été calculés. Pour déterminer la consommation en eau réelle équivalente, un facteur de correction peut être défini par l'usage des données in-situ sur la consommation réelle. Et pour réaliser le deuxième objectif, il est question d'effectuer une analyse complète des séries chronologiques du NDVI. Sur la base des données de référence sur les parcelles irriguées et non-irriguées, une classification en terme d'irrigation / non-irrigation doit être possible. En fait, les parcelles irriguées doivent montrer un NDVI min/max plus haut que les parcelles non-irriguées, et un profile NDVI plus régulier ou « fluidifié » que pour les parcelles non irriguées qui sont plus exposées aux précipitations. La détermination de la superficie totale et l'emplacement des parcelles irriguées se ferait alors facilement. En outre, en utilisant l'inventaire existant des forages, il est possible de délimiter la zone d'influence des forages déclarés en utilisant les techniques de tamponnage. Par conséquent, les surfaces restantes et qui ne sont pas dans la zone d'influence des

forages inventoriés caractérisent les parcelles qui ne sont pas irriguées par un forage non inventorié. En utilisant la consommation d'eau précédemment déterminée ainsi que les parcelles déterminées irriguées mais non inventoriées, il est possible de déterminer le volume d'eau utilisé par les parcelles non inventoriées, ce qui réalise le troisième objectif.

Goals:

1. Determine the water consumption of the pilot region
2. Determine the irrigated plots which are not inventoried
3. Determine the water consumption of the non inventoried plots

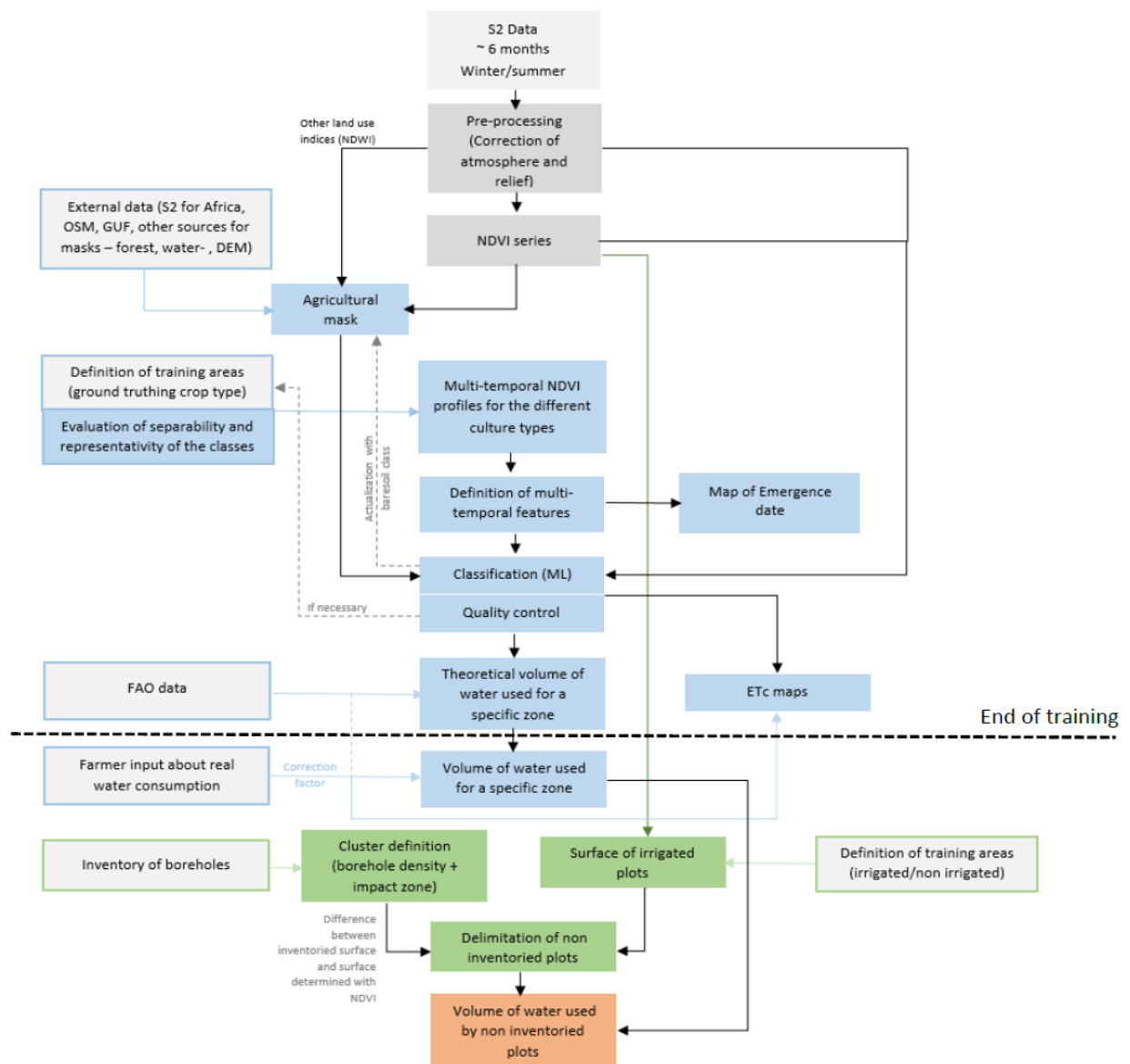


Figure 34: Etapes de travail pour le traitement de la zone d'étude en Algérie

4.2.3 Résultats

Puisque pour l'Algérie la carte d'occupation ESA CCI land cover – S2 prototype land cover 20m map of Africa 2016 (CCI Land Cover, 2017) disponible n'est pas satisfaisante pour le masque des terres cultivés, l'on utilise les données externes disponibles en combinaison avec l'analyse multi-temporelle du NDVI des données Sentinel 2 de l'année 2017. Les données

externes consistent en une couche des zones forestières et une couche des plans d'eau créées par l'ABH. En plus, l'on utilise un seuil sur l'écart-type des valeurs du NDVI des séries chronologiques de Sentinel 2. La Figure 35 montre les couches externes et le masque des terres cultivées qui en résulte. L'analyse plus approfondie est réalisée sans utiliser le masque. Le travail dans le futur doit inclure l'usage de ce masque pour une cartographie des cultures, et ce pour évaluer seulement les zones concernées.

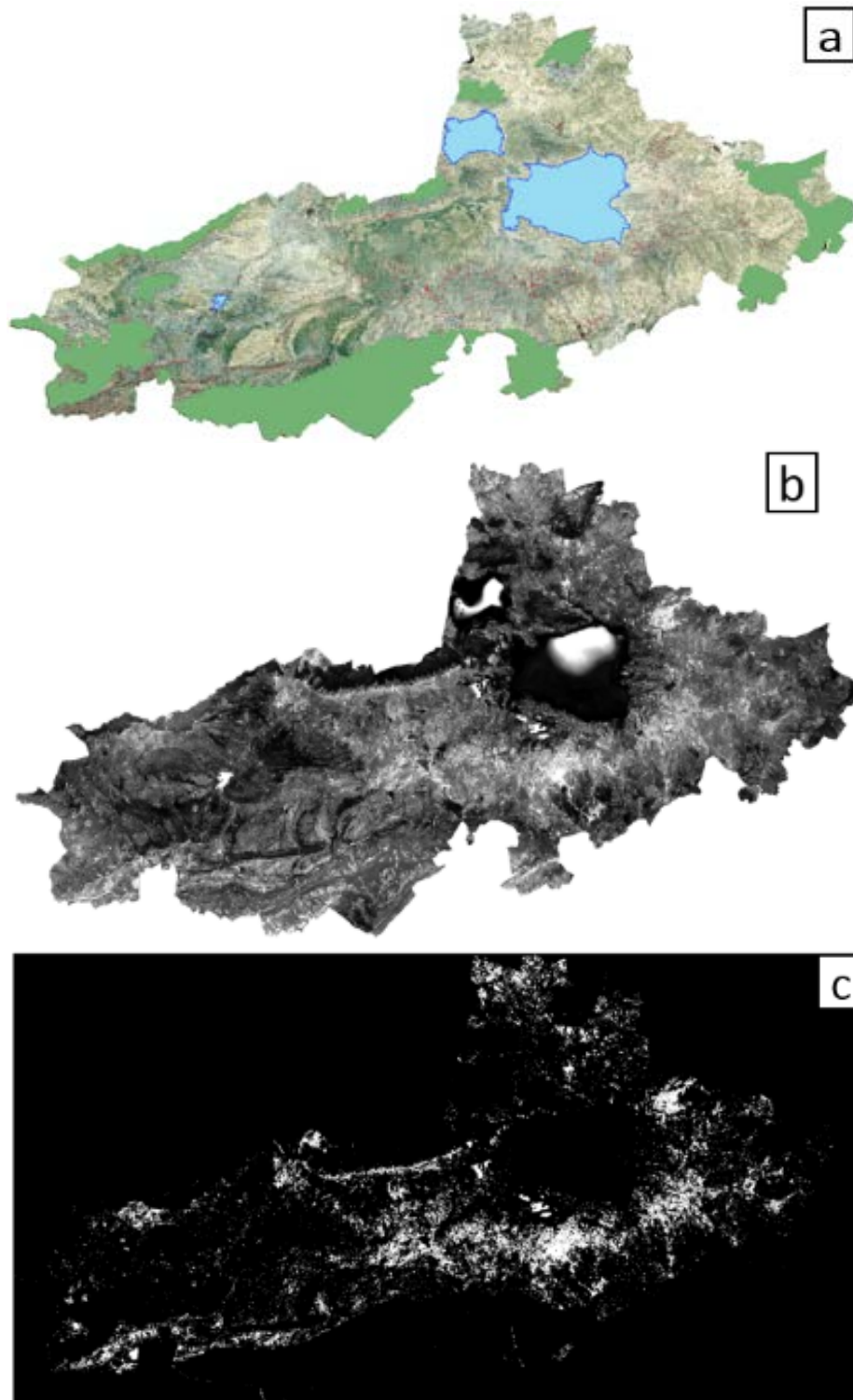


Figure 35: a) Données externes - bleu: masque plans d'eau, vert: masque zones forestières; b) écart-type du NDVI sur l'année 2017; c) masque des terres cultivées résultant après seuillage

La Figure 36 montre les profils NDVI sur toute l'année 2017 par l'usage des données de référence disponibles dans la zone pilote en Algérie. Les profils sont similaires à ceux observés en Tunisie ce qui fait que les mêmes aspects multi-temporels ont été utilisés. Dans cette zone les fourrages et les céréales ont la même période de culture, alors qu'en Tunisie les plantes fourragères arrivent à croissance avant les céréales (Figure 11b). Dans ce cas, il serait utile de définir des aspects multi-temporels additionnels comme la date de récolte qui semble se faire plutôt pour les fourrages et les céréales si l'on considère les profils NDVI de la Figure 36. Cependant, comme les données de référence n'étaient pas fiables pour la différenciation entre les fourrages et les céréales, les mêmes aspects ont été utilisés pour la classification comme en Tunisie. Pour des travaux futurs, il est recommandé d'explorer des données de référence nouvelles et plus fiables et définir même des aspects supplémentaires.

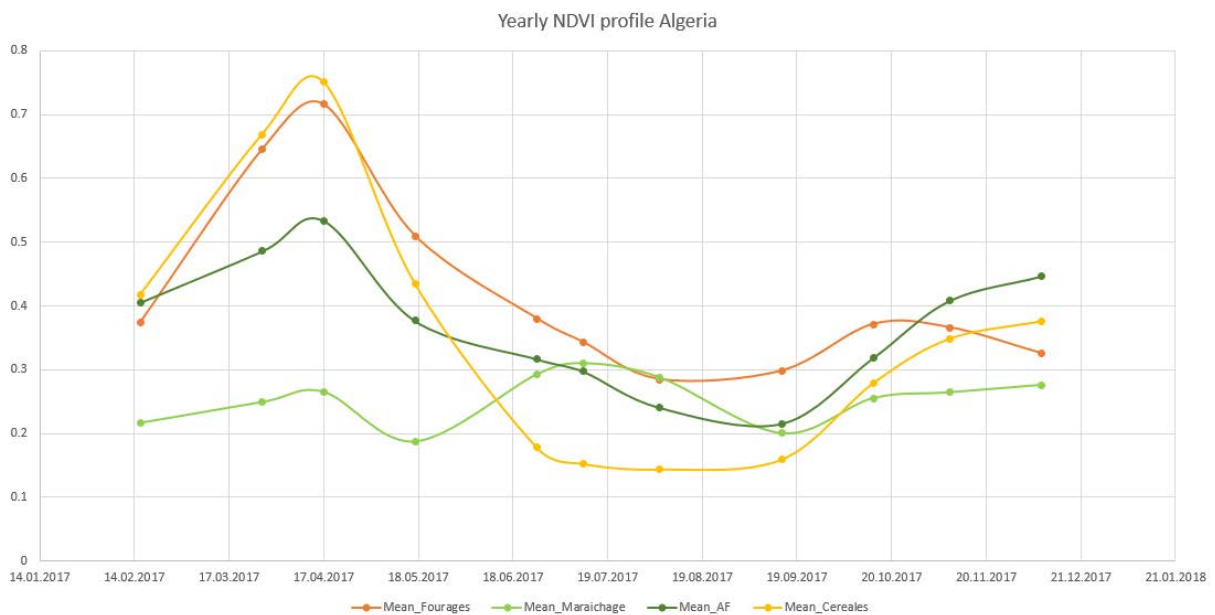


Figure 36: Profils NDVI pour l'année 2017 pour quatre types de cultures différents en Algérie.

La classification a été réalisée sur la scène de Sentinel 2 du 17.04.2017, avec l'usage de 8 bandes spectrales (B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8a) et de 3 bandes multi-temporelles additionnelles (max NDVI, min NDVI, Différence minimum-maximum). Par ailleurs, en considération des données de référence et parce que l'on ne cultive pas beaucoup de légumes dans la zone pendant l'hiver, seulement quatre classes ont été considérées : arbres, céréales, fourrages et sol nu. Le résultat est montré dans la Figure 37. Il est nécessaire de mentionner qu'en raison de la grande étendue, trois tuiles différentes doivent être mosaïquées avant le traitement.

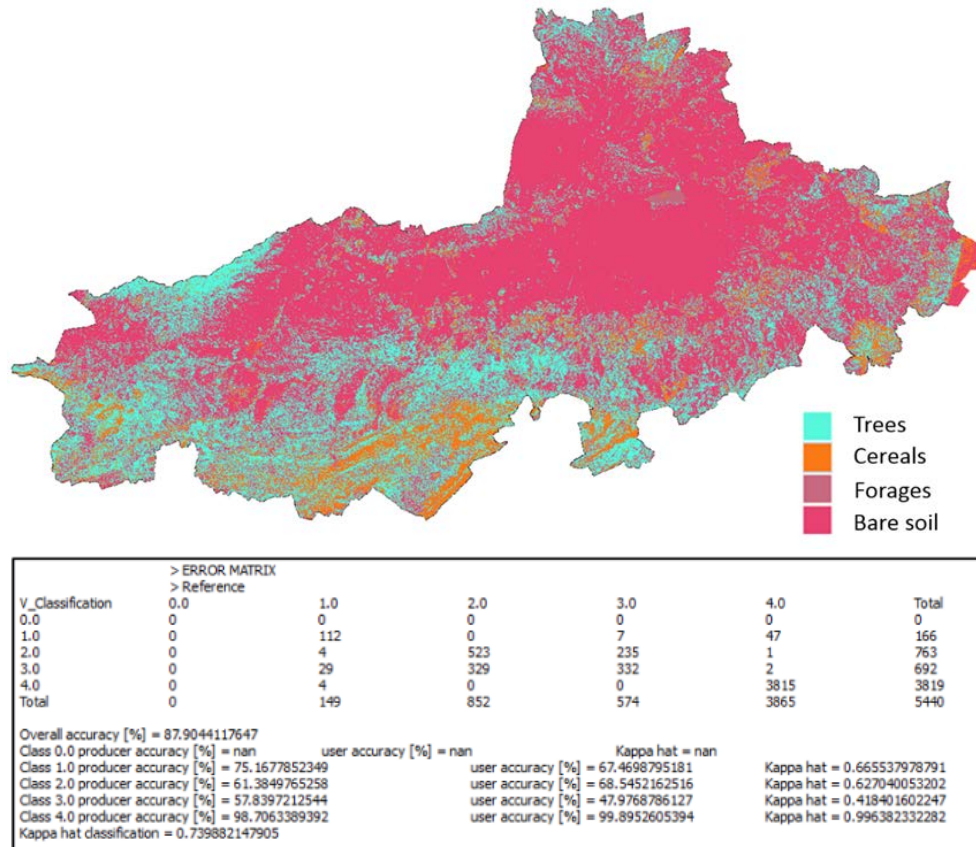


Figure 37: Carte de classification et matrice de confusion de la classification maximum likelihood pour la plaine de Remila

La matrice de confusion montre une précision globale de près de 88%. L'examen des *producer's accuracies* et des *user's accuracies* montre que le sol nu et les arbres sont mieux classifiés que les céréales et les fourrages. Notamment pour le sol nu, cela est dû au fait que davantage de données de formation fiables étaient disponibles (telles qu'elles sont définies en utilisant Google Earth). Ce résultat global est par conséquent biaisé par la très bonne classification du sol nu en comparaison avec les autres classes. L'usage des données de référence meilleures et plus fiables pour les autres classes doit aider à améliorer la classification globale. L'on doit alors s'assurer qu'à peu près la même quantité de pixels de référence est disponible pour chaque classe.

4.3 Traitement RADAR

4.3.1 Données

Pour l'Algérie, seulement les données Sentinel 1 IW ont été traitées. Une plus haute résolution dans ce cas n'est pas nécessaire puisqu'il s'agit d'observer des mouvements à grande échelle. La grande superficie de la zone pilote peut être couverte avec un seul *data stack*. En plus, pour la Tunisie, une forte corrélation a été observée entre les données TerraSAR-X et celles de Sentinel 1. Les données Sentinel 1 sont par conséquent considérées suffisantes pour de nouvelles enquêtes puisque l'objectif était de déterminer le mouvement du sol à grande échelle, et les données Sentinel 1 sont préférées vu leur disponibilité gratuite. Le Tableau 9 résume le nombre des acquisitions disponibles pour chaque série de données. Une

présentation générale des séries de données acquises avec les dates d'acquisition est fournie en Annexe 3.

Tableau 9: Nombre des acquisitions disponibles et durée pour chaque détecteur retenu

	Ascending	Descending
Sentinel 1	60 séries de données, de 11.2014 à 05.2017	61 séries de données, de 01.2015 à 05.2017

Seulement les séries de données ascendantes ont été traitées au moment de l'établissement du rapport.

4.3.2 Méthodologie

En considération des résultats obtenus pour la Tunisie, l'entière série de données Sentinel 1 *ascending* a été traité pour l'Algérie en utilisant la technique SBAS. En effet, en raison de la détection des *distributed scatterers*, cette méthode donne plus d'informations sur le mouvement du sol dans les zones rurales que la technique PSI, qui est d'une grande importance pour l'analyse du mouvement du sol en raison de l'extraction des eaux souterraines dans les zones agricoles.

4.3.3 Résultats and interprétation

La Figure 38 montre les premiers résultats du traitement SBAS en Algérie. Des zones d'affaissement locales sont observables au milieu et dans la partie nord-ouest du cadre considéré. Une comparaison rapprochée avec un DEM montre que les zones d'affaissement régionales les plus modérées dans le sud et dans la partie nord se trouvent dans les zones montagneuses autour de la plaine. Ces zones peuvent être causées par des inexactitudes de phase résiduelle atmosphérique ou topographique et non par des effets de mouvement du sol. Plus particulièrement dans le nord, les zones d'affaissement ne sont pas homogènes et présentent des données manquantes à la frontière supérieure (très peu de *scatterers* en comparaison avec le reste du cadre). Pour fournir un résultat plus homogénéisé, le traitement SBAS doit être réalisé à nouveau en considérant les données supplémentaires qui seront disponibles d'ici là.

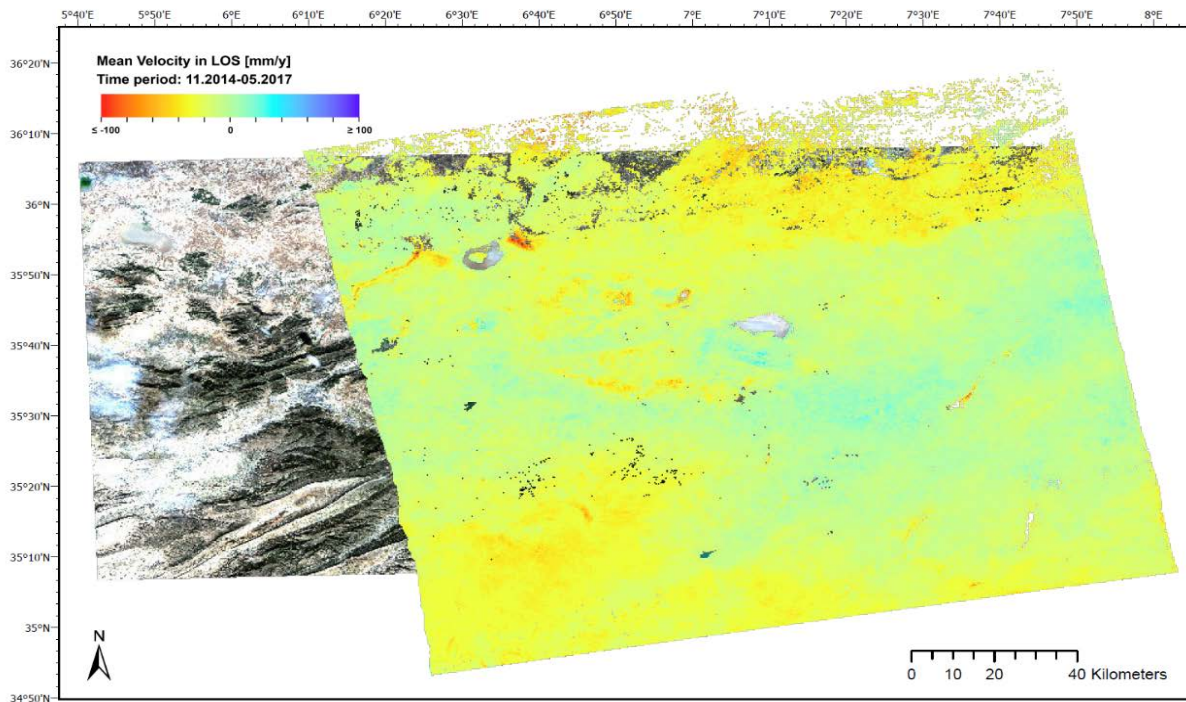
SBAS on Sentinel 1 ascending data


Figure 38: Résultat SBAS pour la plaine de Remila, Algérie, sur données ascending de Sentinel 1.

L'interprétation qui suit est basée sur les premiers résultats présentés et non retraités, d'où la nécessité de la considérer avec prudence comme elle peut contenir des erreurs d'interprétation. L'interprétation des zones de mouvement local en relation avec leur entourage immédiat est cependant possible et est ci-après montré pour les zones situées au milieu et dans la partie nord-ouest du cadre (encadré en couleur dans la Figure 39). Ces zones montrent un affaissement particulièrement fort en relation avec leurs entourages immédiats.

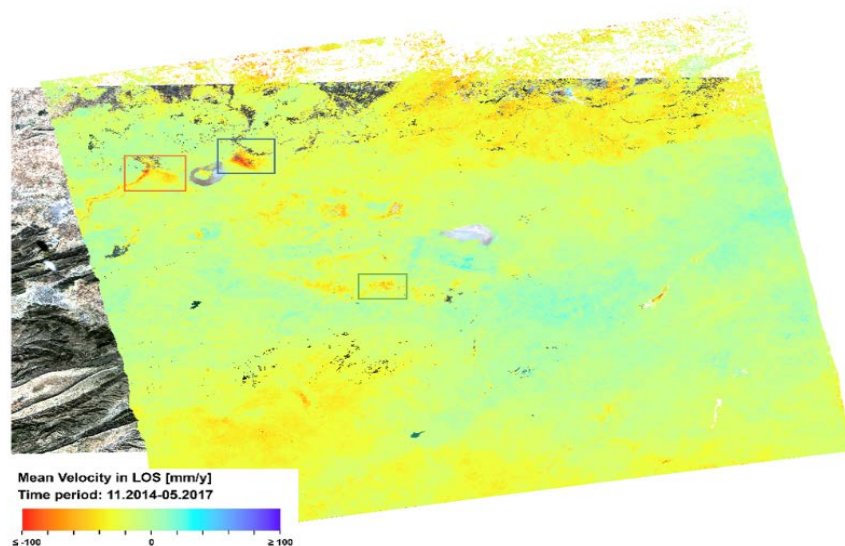


Figure 39: Zones retenues pour l'analyse

L'examen de plus près des zones correspondantes dans l'imagerie multi-spectrale (Figure 40) suggère la présence de plusieurs puits (flèches et cercles rouges) dans des zones marquées par un affaissement fort (encadrés noirs). En raison de la résolution spatiale, cette supposition

doit être confirmée par une vérification sur le terrain. Cela pourrait expliquer l'affaissement dû à l'usage important des eaux souterraines directement tirées de l'aquifère dans presque chaque parcelle agricole.

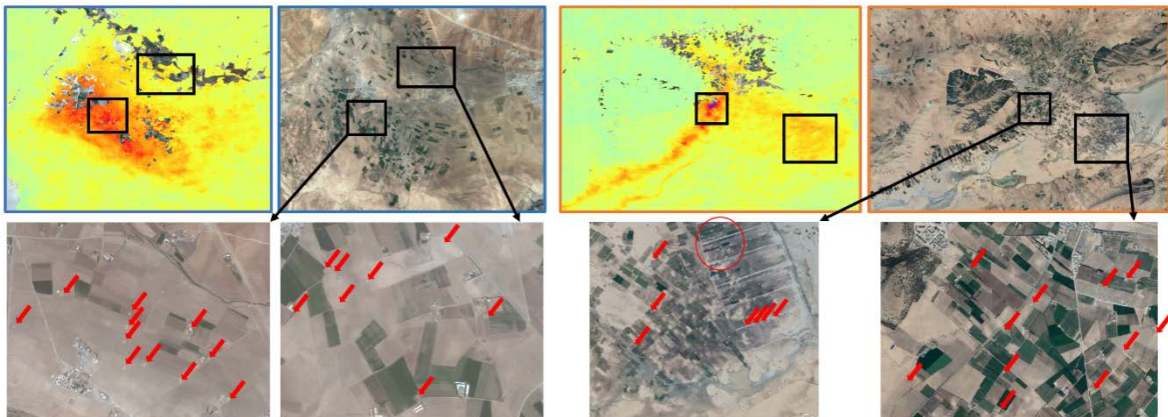


Figure 40: Zoom-up sur zones choisies et identification des puits; source d'imagerie optique: Google Earth

Un examen encore plus rapproché de ces puits présumés est donné en Figure 41 pour la zone verte tracée dans la Figure 40. Pour chaque affaissement local, un ou plusieurs puits peuvent être trouvés dans le voisinage immédiat du cône de l'affaissement principal (marqué par les flèches en couleurs). Ces puits ouverts sont assez grands et tout à fait reconnaissables sur l'imagerie optique à haute résolution (ici Google Earth a été utilisé). Ils sont principalement caractérisés par une forme presque parfaitement circulaire, ils sont sombres au milieu et ils sont souvent entourés par une zone assez claire (sablonneuse). Par conséquent, il serait concevable d'utiliser des méthodes de détection automatiques sur imagerie optique à haute résolution pour détecter ces puits. Ici aussi, une vérification sur le terrain s'impose pour vérifier la présence de puits dans ces endroits.

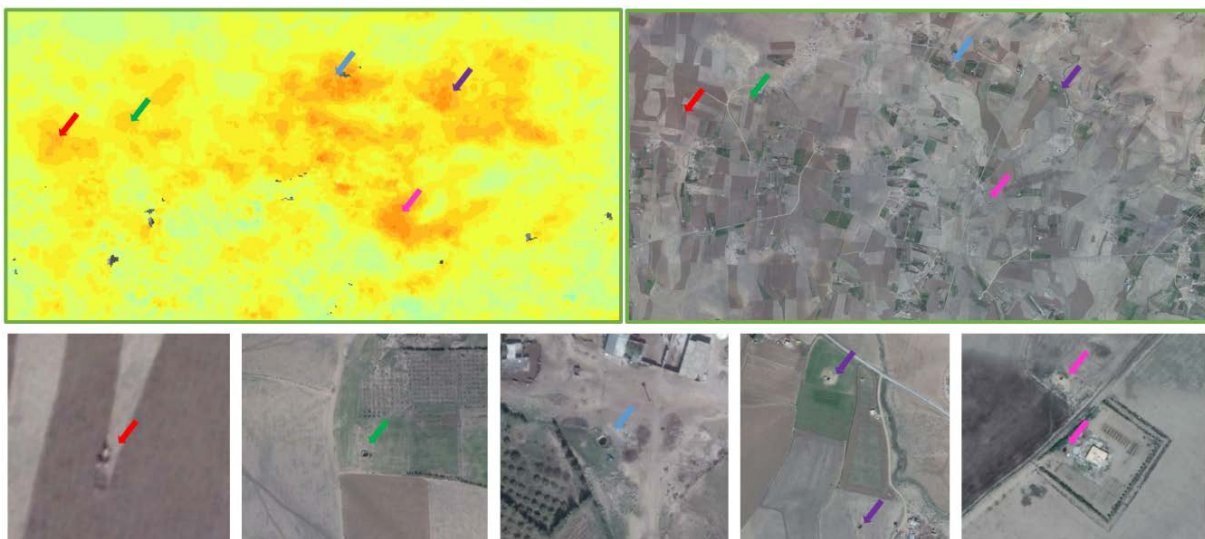


Figure 41: Examen de plus près des puits présumés; source d'imagerie optique: Google Earth

5. Maroc

Pour le Maroc, les données Sentinel 1 sont disponibles pour la zone pilote depuis mars 2015. Quelques données ont été téléchargées et font l'objet de l'Annexe 4. Aucun traitement n'a encore été réalisé.

6. Représentation du Project

6.1 Encadrement des étudiants stagiaires

Pendant la durée du projet deux étudiants stagiaires ont appuyé le projet au siège du BGR à Hanover.

La première étudiante était au siège du BGR pendant quatre semaines en septembre /octobre 2016. Son objectif était d'analyser et corriger les données de référence pour le traitement optique acquises pendant trois différentes campagnes de terrain en 2015. Son travail a contribué à la visualisation des références incohérentes et à la réduction du nombre des classes de cultures pour des acquisitions ultérieures de réalité du terrain, et ce à travers une analyse de séparabilité.

Le deuxième étudiant était au siège du BGR pendant huit semaines en août/septembre 2017. Pendant cette période, il a réalisé une analyse statistique sur six mois de données du terrain nouvellement acquises et contribué au développement des aspects multi-temporels pour la classification. Il a également évalué différentes méthodes de classification et logiciels de classification. Son travail était une contribution importante à ce projet.

6.2 Formation des partenaires de l'OSS

Le renforcement des capacités est une composante importante de la coopération technique. Lors d'une rencontre au siège du BGR avec l'OSS les 15 et 16 mai 2017, il a été décidé de réaliser une formation de haut niveau pour deux collègues de l'OSS. La formation initiale d'une durée d'un mois était programmée pour septembre 2017, mais en raison d'une coupe budgétaire pendant la dernière moitié de 2017 la formation a été reportée à la période entre le 15 janvier 2018 et le 09 février 2018. Les objectifs de la formation étaient multiples :

- Fournir aux collègues suffisamment de connaissances basiques sur les méthodes de télédétection – cela devait comprendre la connaissance de base sur la télédétection multi-spectrale et la télédétection RADAR et jusqu'à la mise en œuvre de méthodologies spécifiques pour déterminer l'usage de l'eau dans l'agriculture à partir de données de la télédétection.
- Développer une méthode pour déterminer la consommation en eau avec les données de télédétection en respect des objectifs spécifiques de l'OSS et de l'ABH.
- Former les formateurs

Les documents de la formation ont été élaborés et diffusés et des exercices pratiques ont été effectués en utilisant les données Copernicus et aussi les données de référence et externes disponibles. En outre, chaque stagiaire a documenté les exercices pratiques dans des présentations PowerPoint qui peuvent servir, avec quelques réajustements, de tutoriels pour des formations futures.

6.3 Présence dans les conférences

Participations aux conférences en relation avec le projet:

- Zambia Water Forum and Exhibition (ZAWAFE), 12-13 juin 2017, Lusaka, Zambie
- INSPIRE Conference 2017, 6-8 septembre 2017, Strasbourg, France
- 27th Colloquium of African Geology (CAG 27), 21-28 juillet 2018, Aveiro, Portugal
- ISPRS TC I Midterm Symposium Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications, 10-12 octobre 2018, Karlsruhe, Allemagne (papier accepté)
- World Water Week 2019, 25-30 août 2019, Stockholm, Suède.

Une liste des présentations, des résumés et des publications en relation avec ces conférences est donnée dans la section suivante.

6.4 Publications

- Dubois, C., Bäumle, R., Himmelsbach, T. (2017) New Approaches of Remote Sensing for the Determination of Hidden Ground Water Bodies, Zambia Water Forum and Exhibition (ZAWAFE), 12-13 June 2017, Lusaka, Zambia (abstract + oral presentation)
- Dubois, C., Frei, M., Lege, T. (2017) Geospatial Copernicus Data and Standards: Applications in the International Technical Cooperation, INSPIRE Conference 2017, 6-8 September 2017, Strasbourg, France (abstract + oral presentation)
- Dubois, C., Stoffner, F., Frei, M. (2018) Methods of Remote Sensing for Assessing Groundwater Exploitation in the Maghreb Region, 27th Colloquium of African Geology (CAG 27), 21-28 July 2018, Aveiro, Portugal (abstract + poster presentation)
- Dubois, C., Stoffner, F., Sandner, M., Labiadh, M., Mimouni, M. (2018), Copernicus Sentinel-2 Data for the Determination of Groundwater Withdrawal in the Maghreb region, ISPRS TC I Midterm Symposium Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications, 10-12 October 2018, Karlsruhe, Germany (peer-reviewed full paper + oral presentation, submitted)
- Stoffner, F., Krekeler, T., Mimouni, M., Ait Raoui, O., Aureli, A., Wende, F. (2019) Innovations in Groundwater Monitoring: Potential of Telemetry and Remote Sensing, World Water Week 2019, 25-30 August 2019, Stockholm, Sweden (oral presentation)

7. Conclusions travail à venir

Au début du projet, différentes approches de classification des types de culture à travers l'usage des données satellitaires commerciales ont été testées en Tunisie. En raison d'une dynamique agricole complexe, une détermination détaillée des types de culture s'avère difficile à des dates simples.

Une méthodologie pour l'estimation des besoins des cultures en eau sur la base des données de télédétection optique par Sentinel 1 a été élaborée et validée à l'exemple de la Tunisie. Elle doit encore être appliquée et possiblement légèrement réajustée en vue des besoins spécifiques des zones d'étude en Algérie et au Maroc. À travers l'usage de la classification de l'occupation du sol par l'imagerie optique, les besoins en eau d'une manière globale de grandes zones peuvent être estimés très rapidement et d'une manière solide.

Cette approche de classification développée utilise les données satellitaires adoptant une politique d'accès ouvert aux données, ce qui permet une utilisation durable. En outre, le taux élevé de répétabilité est convenable pour surveiller la dynamique des cultures au fil du temps. Tous les calculs peuvent être effectués avec du freeware et/ou un logiciel d'open source.

Une approche, proposée par la FAO, est utilisée pour estimer les besoins en eau des cultures. Sur la base de la classification de l'occupation du sol, les types de culture sont traduits en besoins théoriques en eau. Et pour quantifier le prélèvement d'eaux souterraines en vue d'adapter l'approche à des cas spécifiques, il sera nécessaire de considérer les données appropriées telles les données du sol, les données des précipitations et les manières d'irrigation typiques. Par ailleurs, une comparaison de ces résultats avec les volumes des eaux souterraines prélevés, s'ils sont disponibles, serait d'un grand intérêt.

En outre, l'approche de classification et ses résultats ont été utilisés pour alimenter le système DSS pour estimer les besoins en eau des différents types de culture.

L'interférométrie RADAR est une technique très utile pour montrer une surexploitation des ressources en eau souterraine comme elle permet de visualiser les mouvements du sol sur une grande surface et dire leur corrélation avec l'utilisation des eaux souterraines en agriculture. C'est en définitive un bon moyen de détecter les zones où s'opère le sur-pompage et aussi possiblement de détecter les puits ou forages non déclarés. Comme c'est le cas pour le traitement optique, une comparaison avec les volumes réels de captage des eaux souterraines serait avantageuse.

Le renforcement des capacités a été réalisé lors d'une formation de haut niveau entre le BGR et les collègues de l'OSS. Maintenant que la méthodologie est développée, les autorités locales en charge de l'eau doivent être formées en matière des techniques de télédétection et aussi en matière des SIG pour pouvoir appliquer cette méthode et l'adapter pour leurs propres besoins dans le futur.

Ces activités engagées conjointement par l'OSS et le BGR ont servi à renforcer les capacités de l'OSS en matière des techniques de télédétection combinées aux perspectives agricoles en vue d'estimer le prélèvement des eaux souterraines. Ces activités donc rendent le projet plus près de réaliser l'objectif conjoint de développement.

8. Références

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M., (1998): Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

CCI Land Cover- S2 prototype land cover 20m Map of Africa 2016, ESA (2017): <http://2016africalandcover20m.esrin.esa.int/> (26.03.2018)

Dubois, C., Stoffner, F., Sandner, M., Labiadh, M., Mimouni, M. (2018): Copernicus Sentinel-2 Data for the Determination of Groundwater Withdrawal in the Maghreb region, ISPRS TC I Midterm Symposium Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications, 10-12 October 2018, Karlsruhe, Germany (peer-reviewed full paper + oral presentation, submitted)

Nouiri, I. (2018): Modélisation WEAP du système hydrogéologique de Nebhana-Kairouan. Modèle conceptuel, données et résultats. Project report.

Annexe 1 – Matrice de confusion, Tunisie

Classification d'hiver (Figure 13b)

V_Classification	> Reference					Total
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
1.0	3113	40	13	726	36	3928
2.0	39	10948	2748	516	99	14350
3.0	49	2282	9194	662	368	12555
4.0	2847	328	1482	20892	65	25614
5.0	52	44	254	368	1848	2566
Total	6100	13642	13691	23164	2416	59013

Overall accuracy [%] = 77.9404537983
 Class 1.0 producer accuracy [%] = 51.0327868852
 Class 2.0 producer accuracy [%] = 80.2521624395
 Class 3.0 producer accuracy [%] = 67.1536045577
 Class 4.0 producer accuracy [%] = 90.1916767398
 Class 5.0 producer accuracy [%] = 76.4900662252
 Kappa hat classification = 0.691646525244

user accuracy [%] = 79.2515274949
 user accuracy [%] = 76.2926829268
 user accuracy [%] = 73.2297889287
 user accuracy [%] = 81.5647692668
 user accuracy [%] = 72.0187061574

Kappa hat = 0.768595693319
 Kappa hat = 0.691644463988
 Kappa hat = 0.651429666398
 Kappa hat = 0.696527582008
 Kappa hat = 0.708242469825

Classification d'été (Figure 13c)

V_Classification	> Reference					Total
	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	
0.0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	1088	75	1721	50	2934
2.0	0	69	1785	369	71	2294
3.0	0	222	5	14913	8	15148
4.0	0	1522	575	1560	792	4449
Total	0	2901	2440	18563	921	24825

Overall accuracy [%] = 74.8358509567
 Class 0.0 producer accuracy [%] = nan
 Class 1.0 producer accuracy [%] = 37.504308859
 Class 2.0 producer accuracy [%] = 73.1557377049
 Class 3.0 producer accuracy [%] = 80.3372299736
 Class 4.0 producer accuracy [%] = 85.993485342
 Kappa hat classification = 0.510600681936

user accuracy [%] = nan
 user accuracy [%] = 37.0824812543
 user accuracy [%] = 77.8116826504
 user accuracy [%] = 98.4486400845
 user accuracy [%] = 17.801753203

Kappa hat = nan
 Kappa hat = 0.287571883387
 Kappa hat = 0.753931213668
 Kappa hat = 0.938498067866
 Kappa hat = 0.146347273788

Classification d'été (Figure 13d)

V_Classification	> Reference					Total
	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	
0.0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	2635	108	2764	33	5540
2.0	0	0	1967	92	62	2121
3.0	0	242	0	15600	4	15846
4.0	0	24	365	107	822	1318
Total	0	2901	2440	18563	921	24825

Overall accuracy [%] = 84.6888217523
 Class 0.0 producer accuracy [%] = nan
 Class 1.0 producer accuracy [%] = 90.8307480179
 Class 2.0 producer accuracy [%] = 80.6147540984
 Class 3.0 producer accuracy [%] = 84.0381403868
 Class 4.0 producer accuracy [%] = 89.2508143322
 Kappa hat classification = 0.685121585923

user accuracy [%] = nan
 user accuracy [%] = 47.5631768953
 user accuracy [%] = 92.7392739274
 user accuracy [%] = 98.4475577433
 user accuracy [%] = 62.3672230653

Kappa hat = nan
 Kappa hat = 0.406246974287
 Kappa hat = 0.91947843433
 Kappa hat = 0.938455159657
 Kappa hat = 0.609172654198

Classification d'été (Figure 13e)

V_Classification	> Reference	1.0	2.0	3.0	4.0	Total
0.0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	2558	3	2603	28	5192
2.0	0	35	2176	140	63	2414
3.0	0	247	0	15727	6	15980
4.0	0	61	261	93	824	1239
Total	0	2901	2440	18563	921	24825

Overall accuracy [%] = 85.7401812689
 Class 0.0 producer accuracy [%] = nan user accuracy [%] = nan Kappa hat = nan
 Class 1.0 producer accuracy [%] = 88.1764908652 user accuracy [%] = 49.2681047766 Kappa hat = 0.425552226363
 Class 2.0 producer accuracy [%] = 89.1803278689 user accuracy [%] = 90.1408450704 Kappa hat = 0.890661817678
 Class 3.0 producer accuracy [%] = 84.7222970425 user accuracy [%] = 98.4167709637 Kappa hat = 0.937234652146
 Class 4.0 producer accuracy [%] = 89.4679695983 user accuracy [%] = 66.5052461663 Kappa hat = 0.652147228948
 Kappa hat classification = 0.704653608949

Classification d'été (Figure 13f)

V_Classification	> Reference	1.0	2.0	3.0	4.0	Total
0.0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	2289	0	6380	61	8730
2.0	0	14	1833	92	11	1950
3.0	0	317	0	11976	5	12298
4.0	0	281	607	115	844	1847
Total	0	2901	2440	18563	921	24825

Overall accuracy [%] = 68.2457200403
 Class 0.0 producer accuracy [%] = nan user accuracy [%] = nan Kappa hat = nan
 Class 1.0 producer accuracy [%] = 78.9038262668 user accuracy [%] = 26.2199312715 Kappa hat = 0.164572976562
 Class 2.0 producer accuracy [%] = 75.1229508197 user accuracy [%] = 94.0 Kappa hat = 0.933459906187
 Class 3.0 producer accuracy [%] = 64.5154339277 user accuracy [%] = 97.3816880794 Kappa hat = 0.896199946615
 Class 4.0 producer accuracy [%] = 91.6395222584 user accuracy [%] = 45.6957227937 Kappa hat = 0.436034269726
 Kappa hat classification = 0.450614651212

Classification d'été (Figure 13g)

V_Classification	> Reference	1.0	2.0	3.0	4.0	Total
0.0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	1775	237	1810	26	3848
2.0	0	33	1785	50	88	1956
3.0	0	1093	0	16550	16	17659
4.0	0	0	418	153	791	1362
Total	0	2901	2440	18563	921	24825

Overall accuracy [%] = 84.1933534743
 Class 0.0 producer accuracy [%] = nan user accuracy [%] = nan Kappa hat = nan
 Class 1.0 producer accuracy [%] = 61.1857980007 user accuracy [%] = 46.1278586279 Kappa hat = 0.389994567796
 Class 2.0 producer accuracy [%] = 73.1557377049 user accuracy [%] = 91.2576687117 Kappa hat = 0.903047409322
 Class 3.0 producer accuracy [%] = 89.1558476539 user accuracy [%] = 93.71991619 Kappa hat = 0.75103308754
 Class 4.0 producer accuracy [%] = 85.884907709 user accuracy [%] = 58.0763582966 Kappa hat = 0.564610774228
 Kappa hat classification = 0.640920969025

Classification d'été (Figure 13h)

V_Classification	> Reference	1.0	2.0	3.0	4.0	Total
0.0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	1999	202	3250	11	5462
2.0	0	37	1885	74	122	2118
3.0	0	847	0	15072	15	15934
4.0	0	18	353	167	773	1311
Total	0	2901	2440	18563	921	24825

Overall accuracy [%] = 79.472306143
 Class 0.0 producer accuracy [%] = nan user accuracy [%] = nan Kappa hat = nan
 Class 1.0 producer accuracy [%] = 68.907273354 user accuracy [%] = 36.5983156353 Kappa hat = 0.282089575646
 Class 2.0 producer accuracy [%] = 77.2540983607 user accuracy [%] = 88.990557129 Kappa hat = 0.877999355852
 Class 3.0 producer accuracy [%] = 81.1937725583 user accuracy [%] = 94.5901845111 Kappa hat = 0.785533903686
 Class 4.0 producer accuracy [%] = 83.9305103149 user accuracy [%] = 58.9626239512 Kappa hat = 0.573814901099
 Kappa hat classification = 0.575870322224

Annexe 2 – Données, Tunisie

TerraSAR-X, ascending	ENVISAT ASAR, descending
14.12.2015	24.09.2003
25.12.2015	21.04.2004
05.01.2016	26.05.2004
16.01.2016	04.08.2004
27.01.2016	13.10.2004
07.02.2016	17.11.2004
18.02.2016	22.12.2004
29.02.2016	26.01.2005
11.03.2016	02.03.2005
22.03.2016	06.04.2005
02.04.2016	11.05.2005
13.04.2016	24.08.2005
24.04.2016	02.11.2005
16.05.2016	11.01.2006
07.06.2016	15.02.2006
	22.03.2006
	31.05.2006
	18.10.2006
	27.12.2006
	31.01.2007
	11.03.2009
	22.09.2010

Sentinel 1, ascending – track 88				
04.03.2015	29.12.2015	06.10.2016	15.02.2017	03.07.2017
16.03.2015	10.01.2016	12.10.2016	21.02.2017	09.07.2017
28.03.2015	22.01.2016	18.10.2016	27.02.2017	15.07.2017
09.04.2015	15.02.2016	24.10.2016	05.03.2017	
21.04.2015	27.02.2016	30.10.2016	11.03.2017	
03.05.2015	10.03.2016	05.11.2016	17.03.2017	
15.05.2015	22.03.2016	11.11.2016	23.03.2017	
27.05.2015	03.04.2016	17.11.2016	29.03.2017	
02.07.2015	15.04.2016	23.11.2016	04.04.2017	
14.07.2015	27.04.2016	29.11.2016	10.04.2017	
26.07.2015	09.05.2016	05.12.2016	16.04.2017	
07.08.2015	21.05.2016	11.12.2016	22.04.2017	
19.08.2015	02.06.2016	17.12.2016	28.04.2017	
31.08.2015	14.06.2016	23.12.2016	04.05.2017	
12.09.2015	08.07.2016	29.12.2016	10.05.2017	
24.09.2015	20.07.2016	04.01.2017	16.05.2017	
06.10.2015	01.08.2016	10.01.2017	22.05.2017	
30.10.2015	13.08.2016	16.01.2017	28.05.2017	
11.11.2015	25.08.2016	22.01.2017	03.06.2017	
23.11.2015	06.09.2016	28.01.2017	09.06.2017	
05.12.2015	18.09.2016	03.02.2017	15.06.2017	
17.12.2015	30.09.2016	09.20.2017	27.06.2017	

Sentinel 1, descending – track 95			
09.02.2015	04.02.2016	25.10.2016	18.03.2017
21.02.2015	16.02.2016	31.10.2016	24.03.2017
05.03.2015	28.02.2016	06.11.2016	30.03.2017
17.03.2015	11.03.2016	12.11.2016	05.04.2017
29.03.2015	04.04.2016	18.11.2016	11.04.2017
10.04.2015	16.04.2016	24.11.2016	17.04.2017
22.04.2015	28.04.2016	30.11.2016	23.04.2017
04.05.2015	10.05.2016	06.12.2016	29.04.2017
16.05.2015	22.05.2016	12.12.2016	05.05.2017
09.06.2015	03.06.2016	18.12.2016	11.05.2017
03.07.2015	15.06.2016	24.12.2016	17.05.2017
15.07.2015	09.07.2016	30.12.2016	23.05.2017
08.08.2015	21.07.2016	05.01.2017	29.05.2017
20.08.2015	02.08.2016	11.01.2017	04.06.2017
13.09.2015	14.08.2016	23.01.2017	10.06.2017
31.10.2015	26.08.2016	29.01.2017	16.06.2017
24.11.2015	07.09.2016	04.02.2017	22.06.2017
06.12.2015	19.09.2016	16.02.2017	28.06.2017
18.12.2015	01.10.2016	22.02.2017	04.07.2017
30.12.2015	07.10.2016	28.02.2017	10.07.2017
11.01.2016	13.10.2016	06.03.2017	
23.01.2016	19.10.2016	12.03.2017	

Annexe 3 – Données, Algérie

Sentinel 1, ascending – track 161					
21.11.2014	20.05.2015	15.01.2016	14.05.2016	23.09.2016	21.01.2017
03.12.2014	01.06.2015	27.01.2016	26.05.2016	05.10.2016	02.02.2017
13.02.2015	13.06.2015	08.02.2016	07.06.2016	17.10.2016	14.02.2017
25.02.2015	25.06.2015	20.02.2016	01.07.2016	29.10.2016	26.02.2017
09.03.2015	07.07.2015	03.03.2016	13.07.2016	10.11.2016	10.03.2017
21.03.2015	16.11.2015	15.03.2016	25.07.2016	22.11.2016	22.03.2017
02.04.2015 (2)	28.11.2015	27.03.2016	06.08.2016	04.12.2016	03.04.2017
14.04.2015	10.12.2015	08.04.2016	18.08.2016	16.12.2016	15.04.2017
26.04.2015	22.12.2015	20.04.2016	30.08.2016	28.12.2016	27.04.2017
08.05.2015	03.01.2016	02.05.2016	11.09.2016	09.01.2017	09.05.2017

Sentinel 1, descending – track 66						
02.01.2015	08.05.2016	17.09.2016	22.11.2016	21.01.2017	28.03.2017	27.05.2017 (2)
21.01.2016 (2)	20.05.2016 (2)	29.09.2016	28.11.2016	27.01.2017	03.04.2017	
02.02.2016 (2)	01.06.2016	05.10.2016	04.12.2016	02.02.2017	09.04.2017	
14.02.2016 (2)	13.06.2016	11.10.2016	10.12.2016	08.02.2017	15.04.2017	
26.02.2016	07.07.2016	17.10.2016	16.12.2016	14.02.2017 (2)	21.04.2017	
09.03.2016 (2)	19.07.2016	23.10.2016	22.12.2016	20.02.2017	27.04.2017	
21.03.2016	31.07.2016 (2)	29.10.2016	28.12.2016	26.02.2017 (2)	03.05.2017	
02.04.2016 (2)	12.08.2016	04.11.2016	03.01.2017	04.03.2017	09.05.2017	
14.04.2016	24.08.2016	10.11.2016	09.01.2017	10.03.2017	15.05.2017	
26.04.2016 (2)	05.09.2016	16.11.2016	15.01.2017	16.03.2017	21.05.2017	

Annexe 4 – Données, Maroc

Sentinel 1, descending – track 52						
14.03.2015	29.08.2015					
26.03.2015	10.09.2015					
07.04.2015						
01.05.2015						
13.05.2015						
25.05.2015						
06.06.2015						
18.06.2015						
30.06.2015						
17.08.2015						