

KALIDEOS ADAM : SYNTHÈSE ET RETOUR D'EXPÉRIENCE

Ruxandra Vintila

Institut National de la Recherche en Science du Sol, Agrochimie et Environnement (ICPA)

61, avenue Marasti

011464 Bucarest - ROUMANIE

rvi@icpa.ro fr

Résumé

Le projet de recherche ADAM a été une coopération scientifique entre la France et la Roumanie dédiée à l'Assimilation de Données spatiales par Agro-Modélisation, dont le promoteur et commanditaire a été le Centre National d'Études Spatiales. Le papier présente les principales approches utilisées et les résultats novateurs obtenus dans ADAM : constitution de la première base de données de télédétection de référence, production d'une série temporelle d'images Spot XS de haute qualité, méthode de suivi de l'humidité surfacique du sol au long du cycle cultural à partir d'images radar, définition de la fréquence optimale de revisite pour l'agriculture à l'échelle de la parcelle, développement d'une stratégie performante d'assimilation variationnelle de données spatiales dans les modèles de fonctionnement du couvert végétal, calcul du modèle adjoint d'un modèle complexe de fonctionnement par différentiation automatique, amélioration de la modélisation du transfert radiatif par la prise en compte de l'agrégation des feuilles dans le couvert (modèle CLAMP).

Mots-clés : télédétection spatiale, agriculture, assimilation de données, base de données de télédétection de référence, haute résolution temporelle, haute résolution spatiale.

Abstract

The ADAM research project was a scientific co-operation between France and Romania dedicated to the Assimilation of spatial Data within Agriculture Models, the promoter and sponsor being the French Space Agency (CNES). The paper presents the principal approaches used and the innovative results obtained in ADAM: constitution of the first reference remote sensing data base, production of a Spot XS time series of high quality, method for monitoring soil surface moisture during the entire growing season using radar images, definition of the optimal revisit frequency for field-scale agriculture, development of an efficient strategy of variational assimilation of spatial data in canopy functioning models, calculation of the adjoint model of a complex canopy functioning model by automatic differentiation, improvement of the radiative transfer modelling by taking into account the leaf clumping within canopies (CLAMP model).

Keywords: *spatial remote sensing, agriculture, data assimilation, remote sensing reference database, high temporal resolution, high spatial resolution.*

1. Introduction

ADAM est l'acronyme du projet de recherche « Assimilation de Données spatiales par Agro-Modélisation », qui s'est déroulé de 2000 à 2004 dans le cadre d'une coopération scientifique entre la France et la Roumanie. Les deux pays étaient représentés d'une part par le Centre National d'Études Spatiales (CNES), en qualité de promoteur et commanditaire, l'unité d'Avignon de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et l'École Supérieure d'Agriculture de Purpan (ESAP) de Toulouse, et d'autre part par l'Agence Spatiale Roumaine (ASR), l'Institut National de la Recherche en Science du Sol, Agrochimie et Environnement (ICPA) de Bucarest et l'Institut de la Recherche de la Culture des Céréales (ICDA) de Fundulea.

Dans les années 1990, l'agriculture de précision, à cause de son besoin accru en informations localisées non accessibles à partir seulement des données

radiométriques, demandait de nouvelles approches. Parmi celles-ci, l'assimilation de données spatiales dans des agro-modèles était prometteuse.

Le CNES, dans le cadre de ses activités de développement des technologies pour les applications, étudie la réalisation de systèmes spatiaux dédiés au suivi des parcelles agricoles, selon les modèles de surveillance et d'alerte utilisés opérationnellement en météorologie et océanographie. ADAM a ainsi constitué l'une des premières étapes des études débouchant sur la mission scientifique VEN μ S.

2. Objectifs et approches

L'objectif principal de ce projet, financé principalement par le budget R&T du CNES, était d'analyser l'utilisation des données d'observation spatiale à haute résolution temporelle et haute résolution spatiale pour une caractérisation fine du fonctionnement des couverts végétaux, visant particulièrement une meilleure gestion des systèmes agricoles.

De façon générale, l'agriculture raisonnée implique, entre autres, une gestion optimale des intrants tels que la fumure azotée, l'eau d'irrigation ou les pesticides, et exige donc une évaluation dynamique de l'état des cultures pour identifier les zones affectées par des carences minérales, stress hydrique, maladies, etc. Ce suivi se montre essentiel dans le contexte de l'agriculture de précision, dont la particularité est justement un besoin d'informations détaillées, localisées et à jour sur l'état des cultures, afin d'optimiser la quantité d'intrants pour chaque zone homogène d'une parcelle.

Des séries de données de télédétection à haute résolution spatiale, mais surtout temporelle et spectrale, n'étaient pas disponibles en l'an 2000 de façon opérationnelle. D'autre part, plusieurs résultats de recherche démontraient que de telles informations agronomiques étaient susceptibles d'être produites à l'aide de la télédétection spatiale. Par exemple, (BARET00) a montré que l'état des cultures agricoles et leur stade phénologique pourraient être estimés si les connaissances sur les processus physiques et physiologiques avaient été prises en compte d'une manière explicite. À cette fin, l'utilisation conjointe d'un modèle agrophysiologique et d'une chaîne de modèles de transfert radiatif, accompagnée par une exploitation explicite de la dimension temporelle des données spatiales, devait mieux contrôler la simulation de la croissance et du développement des cultures, et plus généralement la modélisation du fonctionnement des couverts végétaux.

Cette prémisse a été vérifiée dans le projet ADAM par l'utilisation concurrente des trois satellites Spot opérationnels à cette période (Spot 1, 2 et 4), pour assurer la haute fréquence temporelle (BARET01). Le but était donc de vérifier si des informations nécessaires aux opérations culturales modulées au sein des parcelles pourraient être produites par télédétection spatiale, avec la précision et l'anticipation nécessaires aux marchés agricoles.

L'approche proposée dans ADAM afin de produire ces informations à l'échelle de la parcelle était novatrice pour l'agriculture. En effet, la technique d'assimilation des données spatiales permet d'exploiter d'une façon très satisfaisante leur dimension temporelle, essentielle pour caractériser le fonctionnement des agroécosystèmes qui sont intrinsèquement dynamiques. En outre, le couplage des modèles permet des échanges d'informations explicites. Par exemple, le modèle agrophysiologique peut fournir aux modèles de transfert radiatif une description dynamique des variables d'état du couvert, donnant surtout des indications sur sa structure.

À cet égard, (Lauvernet, 2005) a développé une méthode d'assimilation de données spatiales dans les modèles de fonctionnement de la végétation, en adaptant une méthode variationnelle de contrôle optimal basée sur le calcul du modèle adjoint (Le Dimet et

Talagrand, 1986), dont la performance avait été prouvée en météorologie et océanographie. L'adjoint a été calculé pour deux niveaux très contrastés de complexité de la description du fonctionnement du couvert : (1) modèle simple d'évolution de l'indice foliaire (BONSAI, développé dans ADAM) ; (2) modèle agrophysiologique complexe et générique (STICS, élaboré par (Brisson et al., 2003)).

Il faut aussi souligner que, par rapport à la méthode initiale, la stratégie d'assimilation proposée a pris en compte la forte cohérence spatiale qui caractérise les cultures agricoles tout au long de leur développement.

L'illustration schématique du contexte où s'est intégrée cette approche est présentée dans la **Figure 1**.

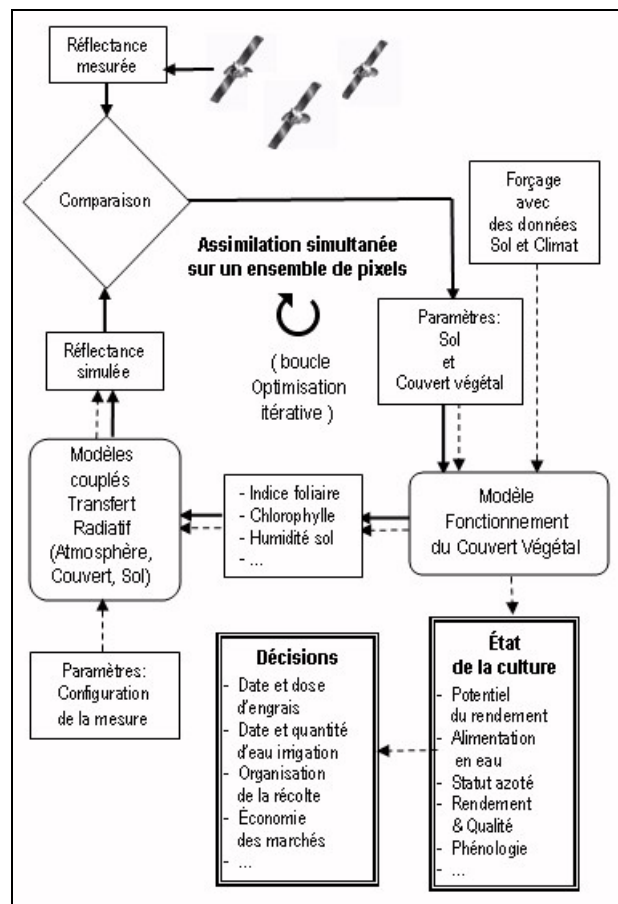


Figure 1 : Approche variationnelle d'Assimilation de Données spatiales par Agro-Modélisation avec prise en compte de la cohérence spatiale des parcelles agricoles.

En outre, pour rendre plus performant le processus d'assimilation, qui dépend en grande partie de la qualité des modèles utilisés, une partie importante du projet ADAM a été consacrée au perfectionnement de la modélisation du transfert radiatif.

À ce moment-là, les modèles de transfert radiatif couramment utilisés reposaient sur une représentation simplifiée du couvert végétal (couches de feuilles uniformément réparties). Dans le cas particulier du développement des cultures agricoles, cette hypothèse n'était pas réaliste, étant donné que les feuilles sont plus

ou moins agrégées autour d'une tige, les cultures très souvent semées en rang, et le milieu discontinu. Suite à cette inadéquation, l'approche choisie a consisté à développer un modèle d'architecture du couvert végétal basé sur une représentation effective de l'agrégation des feuilles (Rochdi et Baret, 2003). Un formalisme générique a été établi en utilisant des maquettes tridimensionnelles, qui permettaient de représenter de manière continue le couvert depuis une répartition uniforme (conforme à la modélisation existante) jusqu'à l'état complètement agrégé. La description de l'agrégation a été ajustée à partir de la mesure de la fraction de trous mono et bidirectionnelle par des photographies hémisphériques prises sur différents types de couvert végétal.

Un autre objectif du CNES, mentionné dans l'introduction, visait la conception d'un système spatial dédié à l'agriculture, pour un suivi régulier de l'état des cultures à l'échelle de la parcelle et d'alerte en cas de stress hydrique, carence d'azote, maladies, etc. (Baret et al., 2001), concrétisé depuis par les systèmes VENUS et Sentinel-2. Les investigations menées dans le projet ADAM se sont concentrées sur la définition de la fréquence temporelle optimale d'observations fournissant des informations nécessaires pour la modulation des opérations culturales sur les parcelles avec la précision attendue et à un coût acceptable pour le marché.

La démarche adoptée s'est basée sur la simulation des différentes fréquences d'acquisition (revisite à partir d'un jour jusqu'à un mois) et l'évaluation des conséquences au niveau de l'estimation de l'indice foliaire. L'indice foliaire a été choisi car il s'agit de la plus importante variable biophysique, liée à l'état des cultures et à la récolte, et qui peut être estimée à partir des données optiques. Les scénarios d'acquisition simulés ont pris en compte les incertitudes associées à l'estimation de l'indice foliaire et les erreurs de mesure de cette variable, aussi bien que le risque de nébulosité (Vintila et Baret, 2006).

En parallèle des investigations ci-dessus, basées sur des données optiques multispectrales Spot et axées essentiellement sur l'estimation de l'indice foliaire, une étude complémentaire a été conduite concernant l'estimation de l'humidité surfacique du sol (0-5 cm) tout au long du cycle phénologique d'une culture à partir des données radar ERS et RadarSAT et en utilisant le modèle « water cloud » (Prévoit et al., 2003).

Pour pouvoir mener à bien l'ensemble de ces recherches, le projet ADAM a nécessité la création d'une vaste base de données et de connaissances agronomiques et spatiales, accompagnées d'informations pertinentes sur leur contenu et leur organisation (métadonnées). Les idées novatrices ayant servi de base au développement de la base de données et de connaissances ADAM ont été, d'une part, son accès facile une fois validée et, d'autre part, son

utilisation efficace par des scientifiques intéressés par le développement d'autres applications non prévues initialement grâce à l'existence des métadonnées (Favard et al., 2004). Concernant ce dernier aspect, la base ADAM a pu être utilisée avec succès dans des études visant la découverte des structures spatio-temporelles dans des séries temporelles d'images satellite par la technique de la fouille de données (Héas et Datcu, 2005 ; Julea et al., 2010).

3. Données acquises

L'expérimentation a été menée en Roumanie, sur un site agricole d'environ 20 x 20 km² avec un centre de coordonnées 44°27'38" N et 26°37'14" E et un relief en général plat, site choisi en raison de plusieurs avantages eu égard aux objectifs visés :

- Des possibilités d'acquisition de données Spot en haute fréquence temporelle, le site se trouvant en visée directe d'une station de réception, tout en étant suffisamment éloigné des zones à forte demande de programmation pour éviter d'éventuels conflits issus de la concurrence avec des applications commerciales. Il faut souligner que ce projet a permis d'acquérir pour la première fois une série d'images à haute répétitivité (quasi-quotidienne) avec les satellites Spot, en utilisant l'ensemble des satellites Spot 4, 2 et 1 (énumérés ici dans l'ordre de priorité défini dans le projet) ;
- Des moyens humains et matériels au niveau local pour des mesures de terrain intensives et de qualité, assurées par des équipes de recherche de l'ICPA Bucarest et de l'ICDA Fundulea ;
- Des parcelles de grande taille, caractérisées par une bonne variabilité intra et interparcellaire, rendant donc possible le calage et la validation des modèles et des méthodes proposées.

Une caractérisation assez complète du climat et de la couverture pédologique du site ADAM, mettant en évidence les propriétés et les régimes d'intérêt pour la croissance des cultures agricoles, a été décrite par (Canarache, 2002) et (Petcu et al., 2003).

L'acquisition de données spatiales et de terrain a été intensive pendant une année agricole de référence (octobre 2000-juillet 2001) et plus légère durant les deux années suivantes. Au total, sur plus de 300 images acquises par la constellation Spot, 57 images optiques multispectrales, dont 39 pendant l'année de référence, ont été commandées sur le site ADAM.

Afin de corriger ces images des effets atmosphériques, un photomètre solaire automatique Cimel a été installé, calibré et relié au réseau Aeronet (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, voir « Bucarest ») pour fournir une caractérisation de l'état de l'atmosphère au moment des acquisitions (quantité de vapeur d'eau, épaisseur optique des aérosols, indice de réfraction et granulométrie associée).

De plus, pour répondre à l'objectif de l'estimation de l'humidité surfacique du sol, le projet a commandé 4 images SAR ERS-2 (bande C, angle d'incidence 23°, polarisation VV) et 6 images RadarSAT-1 (bande C, polarisation HH et mode d'acquisition à faible incidence, spécialement choisi pour minimiser les effets de la végétation et de la rugosité du sol) pendant l'année de référence.

Les données météo, nécessaires pour renseigner les modèles choisis par ADAM pour mettre au point le processus d'assimilation de données spatiales, ont été acquises par une station automatique Campbell. Les types de données mesurées tout au long du projet ont été :

- La température et l'humidité relative de l'air,
- La vitesse et la direction du vent,
- La pluviométrie,
- Le profil des températures du sol jusqu'à 1 m de profondeur,
- Le rayonnement global et le rayonnement photosynthétiquement actif (total, direct et diffus).

Toujours afin de renseigner ces modèles, mais aussi pour valider les résultats issus du processus d'assimilation, l'équipe roumaine a effectué le travail de terrain, en suivant la conception originale de l'INRA concernant les stratégies annuelles d'échantillonnage spatial et temporel et les protocoles de mesure.

Les études se sont focalisées sur le blé (*Triticum aestivum L.*), culture très importante pour le marché et pour laquelle divers outils de simulation étaient déjà opérationnels dans les instituts impliqués dans ADAM.

Les mesures et les observations de terrain ont concerné :

- Les propriétés du sol : profondeur, albédo du sol nu sec, contenu en matière organique, caractéristiques chimiques (Ntotal, N-NH4, N-NO3, Psoluble, Ksoluble, pH, CaCO3), texture, densité apparente, courbe de succion, capacité de rétention au champ, point de flétrissement, humidité, réserve utile en eau, résistance à la pénétration, infiltrabilité à la base de chaque horizon, température ;
- Les caractéristiques des cultures de blé : orientation des rangs (par rapport au nord), distance entre les rangs, pratique culturale (doses, forme des apports, etc.), stade phénologique, hauteur du couvert, mauvaises herbes, maladies, indice foliaire, contenu en chlorophylle a et b, biomasse aérienne totale, répartition de la biomasse (en feuilles vertes, sénescences, tiges et épis), contenu en azote de la plante, composantes du rendement, qualité des grains (protéine) ;
- D'autres caractéristiques : profondeur du niveau de la nappe phréatique, profondeur maximale du système racinaire, structure de l'enracinement.

Pendant chaque année culturale, des « Unités Élémentaires d'Échantillonnage » (UEE), parfaitement géo-référencées, ont été définies sur les parcelles de blé pour réaliser les mesures décrites ci-dessus conformément aux protocoles établis. Les UEE ont été définies de la façon suivante (**Figure 2**) :

- Localisation : les UEE sont représentatives de la variabilité intra et interparcellaire existante sur le site, en fonction des facteurs de variation les plus importants (variété du blé, type de sol, culture précédente, fertilisation, irrigation, microtopographie) ;
- Taille : une UEE est un peu plus grande qu'un pixel Spot XS (soit un disque de diamètre $\approx 30\text{m}$), pour prendre en compte les erreurs inhérentes de coregistration des images de la série temporelle ;
- Sélection : les UEE sont reconnaissables dans la série temporelle Spot XS (par choix, autour des UEE, de petits groupes de pixels contigus quasi-homogènes, qui sont en fait des fenêtres de 5 x 5 pixels Spot XS) ;
- Emplacement : les UEE sont suffisamment inscrits à l'intérieur des parcelles agricoles pour que les fenêtres de 5 x 5 pixels soient incluses dans les parcelles, gardant toutefois une distance convenable par rapport aux bordures pour un travail de terrain optimal.

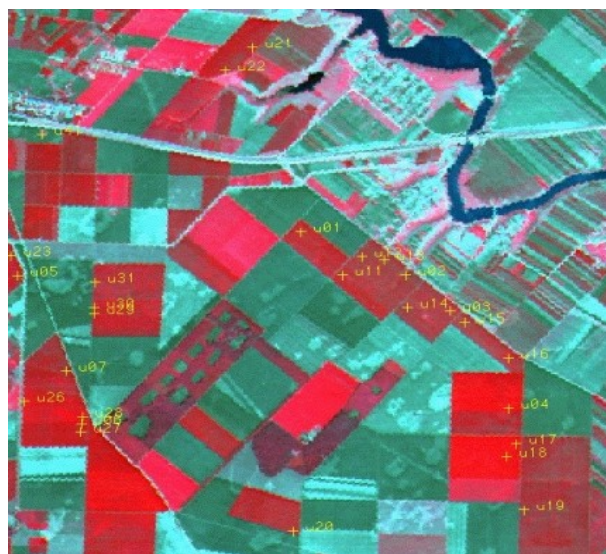


Figure 2 : Le site agricole ADAM et l'emplacement des Unités Élémentaires d'Échantillonnage dans l'année de référence.

De plus, les UEE ont été réparties en deux groupes :

- Des unités destinées à l'étalonnage des modèles de transfert radiatif et de fonctionnement des cultures. Sur ces unités, les mesures ont été les plus complètes et fréquentes (environ chaque semaine) ;
- Des unités destinées à la validation de ces modèles ainsi que des résultats de l'assimilation de données spatiales. Sur ces unités, les mesures ont été moins complètes et fréquentes (quasi-mensuelles).

Pendant l'année de référence 2000-2001, 42 UEE ont été mises en place, dont 10 pour l'étalonnage et 32 pour la validation, tandis que le nombre des UEE a été sensiblement réduit pendant les deux années suivantes.

D'autres détails sur l'expérimentation sont décrits dans (Baret et al., 2001) et dans la documentation mise à la disposition par la base de données ADAM.

4. Résultats

Au-delà de ses objectifs initiaux (strictement agronomiques), et de façon bien plus large, le projet ADAM a introduit le concept de base de données de télédétection de référence et a conduit au développement présent des sites Kalideos du CNES (<http://kalideos.cnes.fr>).

Concernant la base de données ADAM, elle a été volontairement surdimensionnée du point de vue échantillonnage temporel, pour permettre la mise au point d'une stratégie d'assimilation performante, y compris en terme de nombre d'images. Celles-ci devaient servir uniquement à contraindre le modèle de fonctionnement à certaines périodes clés du développement des cultures.

Il faut aussi souligner que la série temporelle des 39 images Spot XS acquises sur Fundulea entre octobre 2000 et juillet 2001 a constitué une véritable première dans le domaine « haute résolution spatiale & haute fréquence de revisite » (Baret et al., 2001 ; Oro et al., 2003 ; Favard et al., 2004).

Les corrections géométriques ont été réalisées à partir d'une référence de grande qualité, sur laquelle l'ensemble des images ont été coregistrées par corrélation automatique avec les outils CNES (chaîne TARIFA). L'image de référence, une scène Spot 4 du 24 mai 2001, a été sélectionnée pour sa qualité radiométrique, l'absence de nuages et une prise de vue quasi nadir. Elle a été corrigée et géoréférencée dans la projection Gauss-Krüger par l'équipe roumaine selon la méthode usuelle : (1) utilisation du modèle paramétrique qui inclut les paramètres orbitaux et d'attitude Spot, afin d'enregistrer l'image selon le réseau dense de points de calage qui avaient été mesurés sur le terrain avec DGPS ; (2) utilisation du MNT local pour corriger l'effet du relief ; (3) rééchantillonnage bilinéaire, étant donné que la convolution cubique, considérée plus appropriée pour les objectifs du projet, n'était pas disponible dans le logiciel utilisé.

La mise au point de l'ensemble de la chaîne de prétraitements géométriques a nécessité plusieurs mois de travaux, avec production de 3 versions successives de jeux de données de qualité croissante. À la fin des traitements géométriques, la précision de la coregistration des images Spot était de l'ordre de 10 m sur l'ensemble de la scène (60 x 60 km²) centrée sur le site ADAM, ce qui correspond à $\approx 0,5$ pixel Spot XS.

En ce qui concerne les traitements radiométriques, ils ont été effectués à partir de coefficients d'étalonnage affinés, prenant en compte l'évolution temporelle des capteurs Spot HRV, et avec des paramètres atmosphériques estimés à partir des données disponibles sur le serveur Aeronet grâce aux mesures acquises sur le site par le photomètre Cimel.

Finalement, deux types de séries temporelles de haute qualité ont été produits : (1) une série temporelle d'images de réflectance au sommet de l'atmosphère (Top Of Atmosphere, TOA) ; (2) une série temporelle d'images de réflectance au niveau du sol (Top Of Canopy, TOC), cette dernière étant utilisée pour la caractérisation fine du fonctionnement des cultures.

Quant au prétraitement des images radar, afin d'aider à la localisation et à l'étalonnage, deux trièdres réflecteurs avaient été installés sur le site dès le début de l'expérimentation (Radnea et al., 2005). Les images radar ont été d'abord corrigées géométriquement en utilisant les paramètres des satellites, puis orthorectifiées à l'aide du MNT local et rééchantillonnées à 20 x 20 m pour assurer la cohérence spatiale avec les images Spot XS. Les valeurs numériques associées à chacun des pixels ont ensuite été transformées en coefficients de rétrodiffusion (σ^0) selon des algorithmes développés par l'Agence Spatiale Européenne pour ERS-2 et l'Agence Spatiale Canadienne pour RadarSAT-1.

Le principal résultat obtenu dans ADAM à partir des images radar a été la démonstration que le modèle semi-empirique « water cloud » représente de façon satisfaisante le signal radar rétrodiffusé par les cultures de blé au long du cycle cultural, ce qui rend possible le suivi de l'humidité surfacique du sol au cours de l'année culturale avec des estimations acceptables (Prévoit et al., 2003).

Un autre résultat du projet, concernant la définition de la fréquence temporelle optimale d'observations, a été obtenu à partir de la série temporelle d'images optiques de réflectance au niveau du sol (Spot TOC), par l'évaluation de la performance d'estimation de l'indice foliaire en fonction de la fréquence d'observations (Baret et Vintila, 2003 ; Vintila et Baret, 2006). Plusieurs scénarios d'acquisition ont été simulés, prenant en compte la variabilité de l'évolution de l'indice foliaire sur des grandes parcelles de blé, ainsi que certaines hypothèses réalistes : trois niveaux d'erreurs des mesures et d'incertitudes des modèles (10, 20 et 25 %), deux niveaux de probabilité de l'occurrence quotidienne de nuages (0,5 et 0,7), ces prémisses étant combinées avec six fréquences de revisite couvrant les possibilités courantes des capteurs (1, 2, 3, 7, 15 et 30 jours). La haute fréquence temporelle a été assurée par l'utilisation concurrente de l'ensemble de trois satellites Spot. Le défaut de continuité temporelle des valeurs estimées de l'indice foliaire a été surmonté en utilisant le modèle semi-empirique de simulation de l'évolution de cet indice

proposé par (Baret et Guyot, 1986), appelé par la suite MODLAI.

Les résultats des simulations ont montré que les erreurs *rms* entre les valeurs de l'indice foliaire estimées par régression multiple et les valeurs de référence mesurées sont faibles et à peu près semblables jusqu'à la fréquence de revisite de 7 jours, indépendamment du niveau d'erreur et d'incertitude ou de la probabilité de nébulosité.

La conclusion de cette investigation a été qu'il était possible de fournir des informations sur l'état des parcelles, avec une précision acceptable, en combinant des données spatiales de haute résolution spatiale (20 m) et d'une fréquence de revisite raisonnablement haute (environ une semaine) avec des connaissances restreintes sur la dynamique de la structure des cultures agricoles.

En parallèle, le même résultat a été obtenu dans ADAM par la stratégie d'assimilation variationnelle de données pixel par pixel développée par (Lauvernet05), à la suite de l'investigation sur deux modèles de fonctionnement des cultures, BONSAÏ et STICS.

Pour accéder aux indices foliaires estimés à partir des données radiométriques (la série temporelle Spot TOC), (Lauvernet, 2005) a couplé chacun de ces deux modèles de fonctionnement au modèle de transfert radiatif PROSAIL. Celui-ci représente la combinaison de deux modèles largement utilisés : PROSPECT, élaboré par (Jacquemoud et Baret, 1990) pour calculer les spectres de réflectance et de transmittance au niveau de la feuille, et SAIL, développé par (Verhoef, 1984) pour simuler les réflectances spectrales bidirectionnelles des surfaces, à partir d'une description physique du transfert radiatif au sein du couvert végétal.

Afin de définir la stratégie d'assimilation, (Lauvernet, 2005) a développé d'abord un modèle simple d'évolution de l'indice foliaire appelé BONSAÏ, une version améliorée (relativement au paramétrage) du modèle MODLAI mentionné ci-dessus. Elle a ensuite calculé le modèle adjoint du modèle BONSAÏ et a validé toute la démarche pixel par pixel.

Le perfectionnement ultérieur de cette démarche, par la prise en compte de la cohérence spatiale des cultures, s'ajoutant à leur cohérence temporelle dans la stratégie d'assimilation simultanée sur un ensemble de pixels, a diminué la fréquence optimale de revisite jusqu'à 15 jours, tout en gardant la précision d'estimation de l'indice foliaire. Cette optimisation a été possible puisque certains paramètres du modèle BONSAÏ sont similaires pour tous les pixels de la même variété (en raison de la similarité du développement phénologique, de la densité et des propriétés des feuilles) ou de la même parcelle (à cause des mêmes pratiques culturales).

Lauvernet (2005) a évalué la stratégie d'assimilation des données pixel par pixel établie à base de BONSAÏ sur le modèle complexe STICS.

Sur ce point, il faut d'abord reconnaître comme résultat tout à fait remarquable le calcul du modèle adjoint du STICS. Ce modèle adjoint a demandé beaucoup d'efforts et d'imagination en raison de nombreuses difficultés liées à l'écriture de STICS, à ses fortes non-linéarités et discontinuités, et aux limitations des premières versions du différentiateur automatique non adaptées à ce type de modèle. Grâce à STICS, des analyses de sensibilité spatiale de certaines variables d'état du modèle ont été menées dans des conditions très différentes et sur plusieurs variétés de blé, afin d'ordonner l'importance locale des paramètres gérant la dynamique de l'indice foliaire et de la biomasse. En revanche, dans ADAM, la stratégie d'assimilation simultanée sur un ensemble de pixels définie par (Lauvernet, 2005) sur BONSAÏ n'a pu être vérifiée sur STICS par manque du temps.

Un dernier résultat à signaler obtenu dans le projet est lié à l'amélioration de la modélisation du transfert radiatif par la prise en compte de l'agrégation des feuilles au niveau de la parcelle.

Rochdi (2003) a développé le modèle CLAMP (CLumped Architecture Model of Plant) afin de générer des maquettes numériques tridimensionnelles pour une large gamme de couverts végétaux à partir de 6 variables d'entrée : l'indice foliaire, l'angle moyen d'inclinaison des feuilles, la taille relative de la feuille, la densité relative des plantes, la distance relative feuilles-tige et la forme de la feuille. La variation de l'agrégation des feuilles a été modulée par la distance relative feuilles-tige, assurant une transition graduelle du milieu turbide couramment modélisé vers un milieu très agrégé. (Rochdi, 2003) a examiné la sensibilité de la fraction de trous aux variables d'entrée du modèle CLAMP et à l'angle zénithal de visée, étant donné que la structure du couvert végétal est généralement prise en compte dans la modélisation du transfert radiatif par cette caractéristique.

Une paramétrisation du coefficient d'agrégation du couvert végétal, caractérisant la dépendance mutuelle entre couches, a été ensuite proposée en fonction de l'angle zénithal de visée et de la distance relative feuilles-tige. Ce paramétrage a été appliqué pour estimer certaines variables biophysiques, telles que l'indice foliaire et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles, à l'aide de photographies hémisphériques prises sur différents couverts végétaux (Rochdi et Baret, 2004).

Outre les applications dans l'agriculture, la base de données ADAM a été utilisée dans des activités de fouille de données. Par exemple, dans (Julea et al., 2010), une approche originale et assez générique a été récemment proposée pour trouver des groupes de pixels partageant des évolutions temporelles communes et significatives, en exploitant la série temporelle Spot XS (TOC) ADAM pour la validation dans le domaine optique.

À son tour, Héas et Datcu (2005) développent, à partir de la série temporelle Spot XS (TOA) ADAM, des méthodes bayésiennes afin de coder l'information contenue dans les séquences d'images. À ce propos, des graphes ont été utilisés, qui sont des modèles statistiques des processus spatio-temporels permettant de décrire des changements physiques observés dans la scène.

Le grand nombre de travaux réalisés a démontré la validité du concept original initié par le CNES. Cette reconnaissance a aussi été traduite par l'attribution du prix du meilleur article 2005 des IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing à Patrick Héas et Mihai Datcu pour « Modeling Trajectory of Dynamic Clusters in Image Time Series for Spatio-temporal Reasoning » (Héas et Datcu, 2005), étude réalisée sur une série temporelle Spot issue de la base de données ADAM.

Références

- Baret, F., Guyot, G., 1986. *Suivi de la maturation de couverts de blé par radiométrie dans les domaines du visible et proche infra-rouge*. Agronomie 6(6), 509-516.
- Baret, F., Weiss, M., Troufleau, D., Prévot, L., Combal, B., 2000. *Maximum information exploitation for canopy characterization by remote sensing*. Aspects of Applied Biology 60, 71-82.
- Baret, F., Vintila, R., Lazăr, C., Rochdi, N., Prévot, L., Favard, J.-C., De Boissezon, H., Lauvernet, C., Petcu, E. et al., 2001. *The ADAM database and its potential to investigate high temporal sampling acquisition at high spatial resolution for the monitoring of agricultural crops*. Romanian Agricultural Research 16, 69-80, (<http://www.incda-fundulea.ro/rar/nr16/16.13.pdf>).
- Baret, F., Vintila, R., 2003. *Satellite derived leaf area index from SPOT time series*, Dans: IGARSS, Toulouse, France, pp. 155-157.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J. P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., and Sinoquet, H., 2003. *An overview of the crop model STICS*. European Journal of Agronomy, Vol. 18, pp. 309-332.
- Canarache, A., 2002. *A Soil Management-Yield System. Case Study for Fundulea-Ileana area*. Journal of the Romanian National Society of Soil Science XXXVI(1), 20-32.
- Favard, J.-C., De Boissezon, H., Baret, F., Vintila, R., 2004. *ADAM: a reference remote sensing and agronomic database dedicated to spatial images assimilation into crop growth models*. Dans: Proc. VIIIth ESAgronomy Congress, pp. 213-214.
- Héas, P., Datcu, M., 2005. *Modelling Trajectory of Dynamic Clusters in Image Time-Series for Spatio-Temporal Reasoning*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43(7), 1635-1647.
- Jacquemoud, S., Baret, F., 1990. *PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra*. Remote Sensing of Environment 34(2), 75-91.
- Julea, A., Méger, N., Rigotti, C., Doin, M.-P., Lasserre, P., Trouvé, E., Bolon, P., Lazarescu, V., 2010. *Extraction of frequent grouped sequential patterns from Satellite Image Time Series*. Dans: IGARSS, Honolulu, Etats-Unis, pp. 3434-3437.
- Lauvernet, C., 2005. *Assimilation variationnelle d'observations de télédétection dans les modèles de fonctionnement de la végétation : utilisation du modèle adjoint et prise en compte de contraintes spatiales*. Thèse de Doctorat de l'Université J. Fourier, Grenoble, France (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00010443/fr/>).
- Le Dimet, F.-X., Talagrand, O., 1986. *Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects*. Tellus, Vol. 38A, pp. 97-110.
- Oro, F., Baret, F., Vintila, R., 2003. *Evaluation of SPOT HRV data over temporal series acquired during the ADAM project*. Dans: IGARSS, Toulouse, France, pp. 2209-2211.
- Petcu, E., Petcu, G., Lazar, C., Vintila, R., 2003. *Relationship between leaf area index, biomass and winter wheat yield, obtained at Fundulea under conditions of 2001 year*, Romanian Agricultural Research 19-20, 21-29 (<http://www.incda-fundulea.ro/rar/nr1920/19.4.pdf>).
- Prévot, L., Voicu, P., Vintila, R., Poenaru, V., De Boissezon, H., Pourthie, N., 2003. *Surface soil moisture estimation from SAR data over wheat fields during the ADAM project*. Dans: IGARSS, Toulouse, France, pp. 2885-2887.
- Radnea, C., Vintila, R., Voicu, P., Poenaru, V., Serban, F., Balota, O., Lazar, C., Petcu, E., Mudura, R., 2005. *Méthodologie des mesures de terrain nécessaires pour étalonner les images radar utilisées pour l'estimation de l'humidité surfacique du sol*. (http://www.icpa.ro/proiecte/AgriTel_Radar.pdf).
- Rochdi, N., 2003. *Un modèle générique d'agrégation des feuilles dans un couvert végétal : application à la simulation du transfert radiatif*. Thèse de doctorat de l'INRA Paris-Grignon, France.
- Rochdi, N., Baret, F., 2004. *Towards accounting for leaf clumping within radiative transfer modelling*. Dans: IGARSS, Anchorage, Etats-Unis, pp. 4655-4658.
- Verhoef, W., 1984. *Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model*. Remote Sensing of Environment, Vol. 16, pp. 125-141.
- Vintila, R., Baret, F., 2006. *Use of multispectral satellite data of high spatial and temporal resolution for crop monitoring*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-8 (PartW48), 139-142.