



Kalideos ADAM

Synthèse et retour d'expérience

Ruxandra VINTILA
ICPA Bucarest & ASAS Bucarest

17 Octobre 2012, CNES (Toulouse)

Données spatiales pour l'agriculture à l'échelle de la parcelle en l'an 2000

Conformément à l'analyse des marchés agricoles
effectuée par ERSIS (2000):

- ⌘ environ 500.000 exploitants étaient potentiellement intéressés
à recevoir des informations agronomiques à la semaine
- ⌘ coût acceptable : $\approx \$ 8 / \text{ha} / \text{an}$
 - ⇒ Étude nécessaire sur la « haute résolution temporelle
& haute résolution spatiale » des données

Résultat connu (en météorologie et océanographie):

la technique mathématique de l'assimilation de données spatiales dans des modèles
permet d'exploiter d'une façon très satisfaisante
la dimension temporelle de ces données

Projet Franco-Roumain

Assimilation de Données spatiales par Agro-Modélisation (ADAM)



Participants

France :

- ⌘ Centre National d'Études Spatiales (CNES Toulouse)
- ⌘ Institut National de la Recherche Agronomique (INRA Avignon)
- ⌘ École Supérieure d'Agriculture de Purpan (ESAP Toulouse)

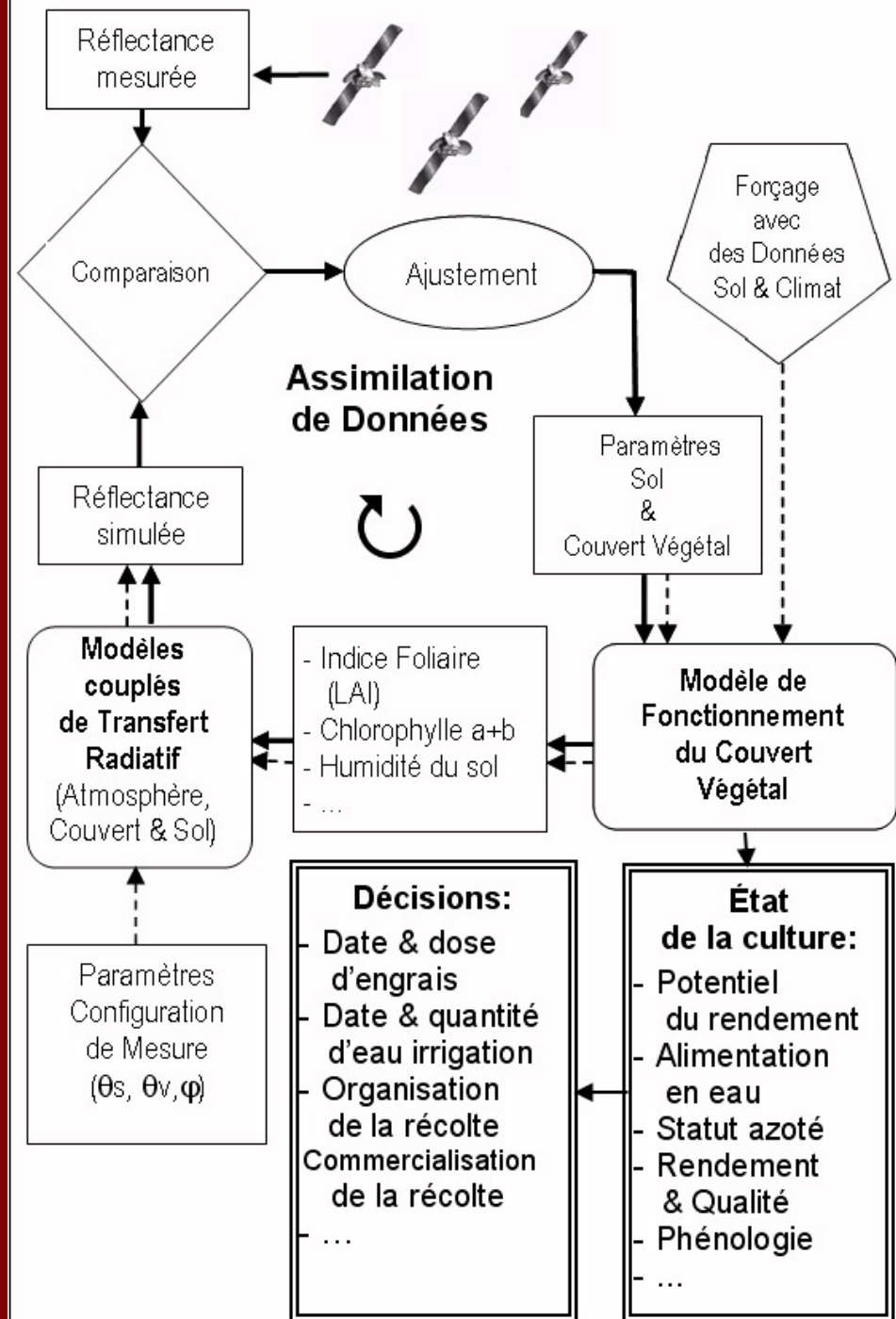
Roumanie :

- ⌘ Agence Spatiale Roumaine (ROSA Bucarest)
- ⌘ Institut National de la Recherche en Science du Sol (ICPA Bucarest)
- ⌘ Institut de la Recherche de la Culture des Céréales (ICDA Fundulea)

17 Octobre 2012, CNES (Toulouse)

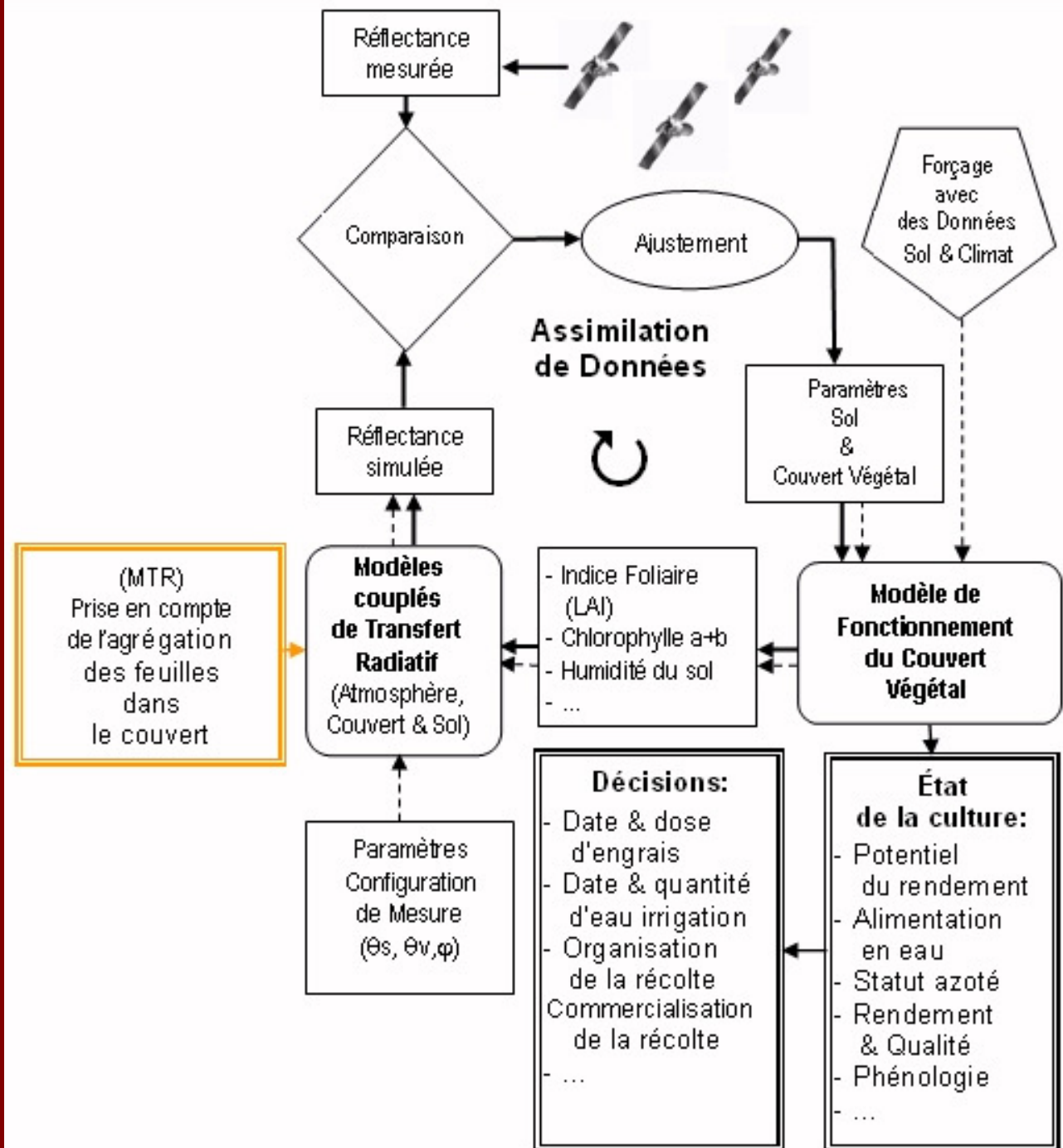
Assimilation de Données Spatiales par Agro-Modélisation

Modèles de Fonctionnement
de la Culture Agricole
couplés aux
Modèles de Transfert Radiatif



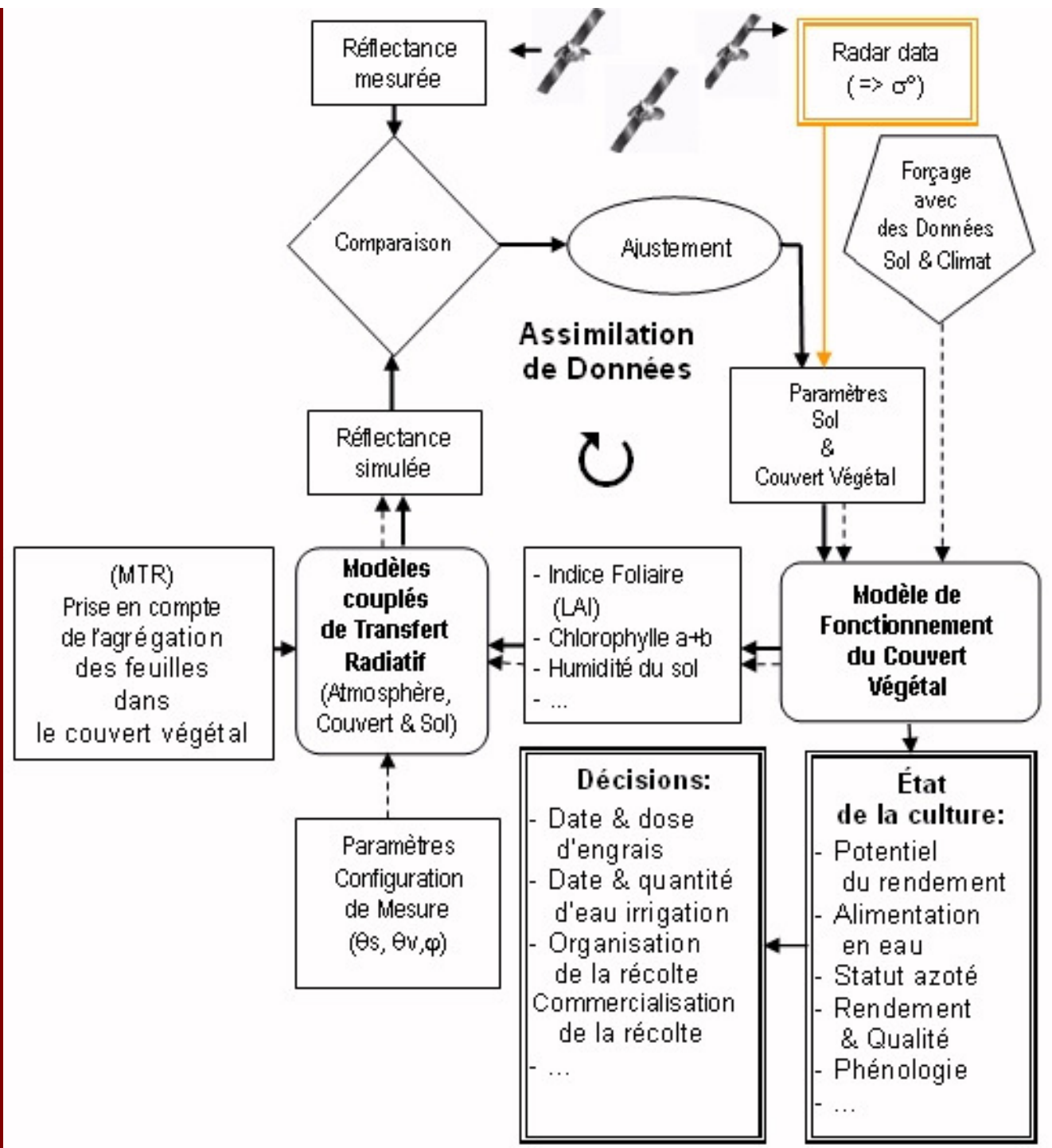
Apports complémentaires

(1) Amélioration de la modélisation du transfert radiatif



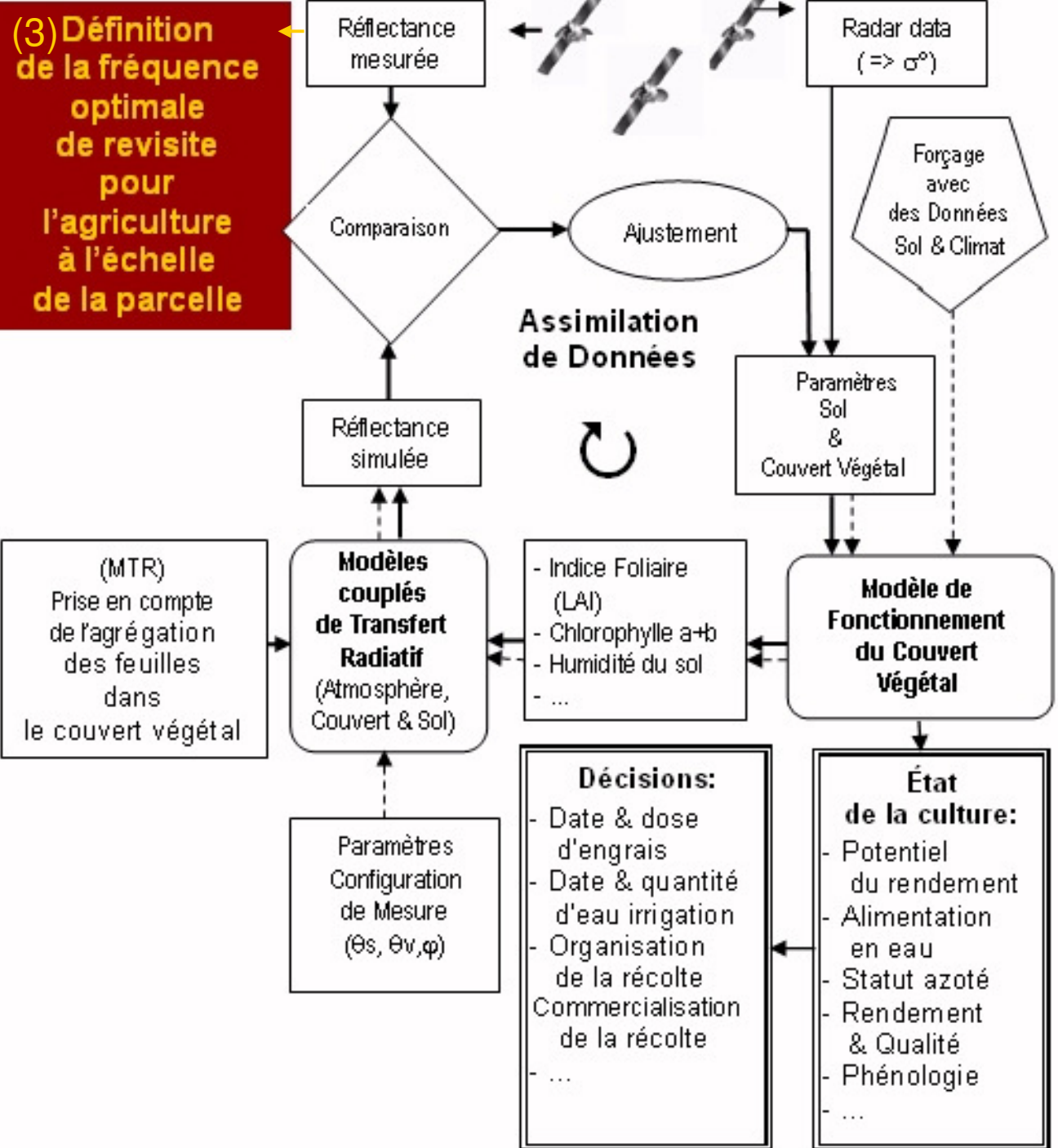
Apports complémentaires

(2) Suivi de l'humidité surfacique du sol au long du cycle cultural



Apports complémentaires

**(3) Définition
de la fréquence
optimale
de revisite
pour
l'agriculture
à l'échelle
de la parcelle**



**Données
SPOT**

↓
**Indice
Foliaire
(LAI)**

**Définition
de la fréquence
optimale
de revisite
pour l'agriculture
à l'échelle
de la parcelle**

Réflectance
mesurée

Comparaiso

Réflectance
simulée

**Prise en compte
de l'agrégation
des feuilles
autour
d'une tige**

**Modèles
couplés
de Transfert
Radiatif**
(Atmosphère,
Couvert & Sol)

Paramètres
Configuration
de mesure

**Assimilation
de Données**

**Indice Foliaire
(LAI)**

**Suivi
humidité du sol**

Ajustement

Paramètres
Sol
&
Culture

Forçage
avec
des Données
Sol & Climat

**Modèle de
Fonctionnement
de la culture
agricole**

**État
de la culture**

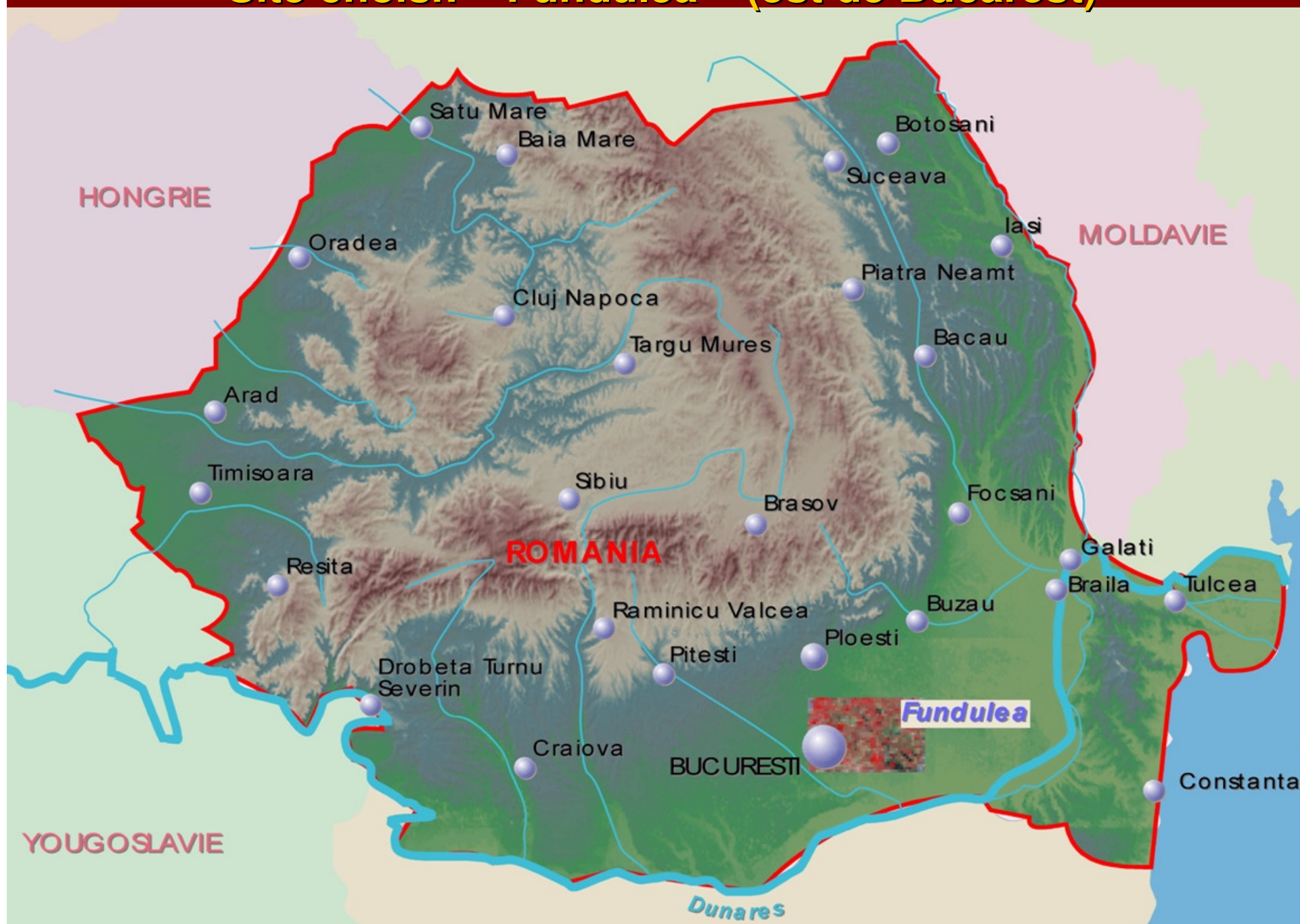
**Données
ERS 2,
Radar_
sat 1**

↓
**Coeff.
de rétro-
diffusion
(σ^0)**

Critères pris en considération pour choisir le site

- ⌘ Site en visée directe d'une station de réception SPOT
- ⌘ Région agricole avec des parcelles de grande taille
- ⌘ Bonne variabilité intra-parcellaire et inter-parcellaire
- ⌘ Accès libre aux parcelles suivies pendant trois années
- ⌘ Relief en général plat
- ⌘ Proportion significative de culture de blé
- ⌘ Des moyens humains et matériels au niveau local
pour des mesures de terrain intensives et de qualité

Site choisi: « Fundulea » (est de Bucarest)



Critères pris en considération pour choisir une unité d'échantillonnage (UE)

- ⌘ Représentative par rapport à la variabilité existante sur le site
 - ☒ Facteurs de variations: variété de blé, type de sol, culture précédente, fertilisation, irrigation et microtopographie
- ⌘ Taille $\geq$ pixel SPOT XS (disque de diamètre $\phi \approx 30$ m)
- ⌘ Reconnaisable dans la série temporelle SPOT
 - ☒ Prise en compte de petits groupes de pixels contigus quasi-homogènes ("fenêtre" de 5 x 5 pixels) autour de l'unité d'échantillonnage
- ⌘ Suffisamment inscrite à l'intérieur de la parcelle
 - ☒ La "fenêtre" correspondante complètement incluse dans la parcelle
 - ☒ Distance raisonnable par rapport aux bordures (pour faciliter le travail de terrain)

Unités d'échantillonnage

Unités réparties en deux groupes:

- ⌘ Unités destinées à l'étalonnage des modèles

- ⌘ Mesures de plante environ chaque semaine

- ⌘ Unité destinées à la validation des modèles et des résultats de l'assimilation des données spatiales

- ⌘ Mesures de plante quasi-mensuelles

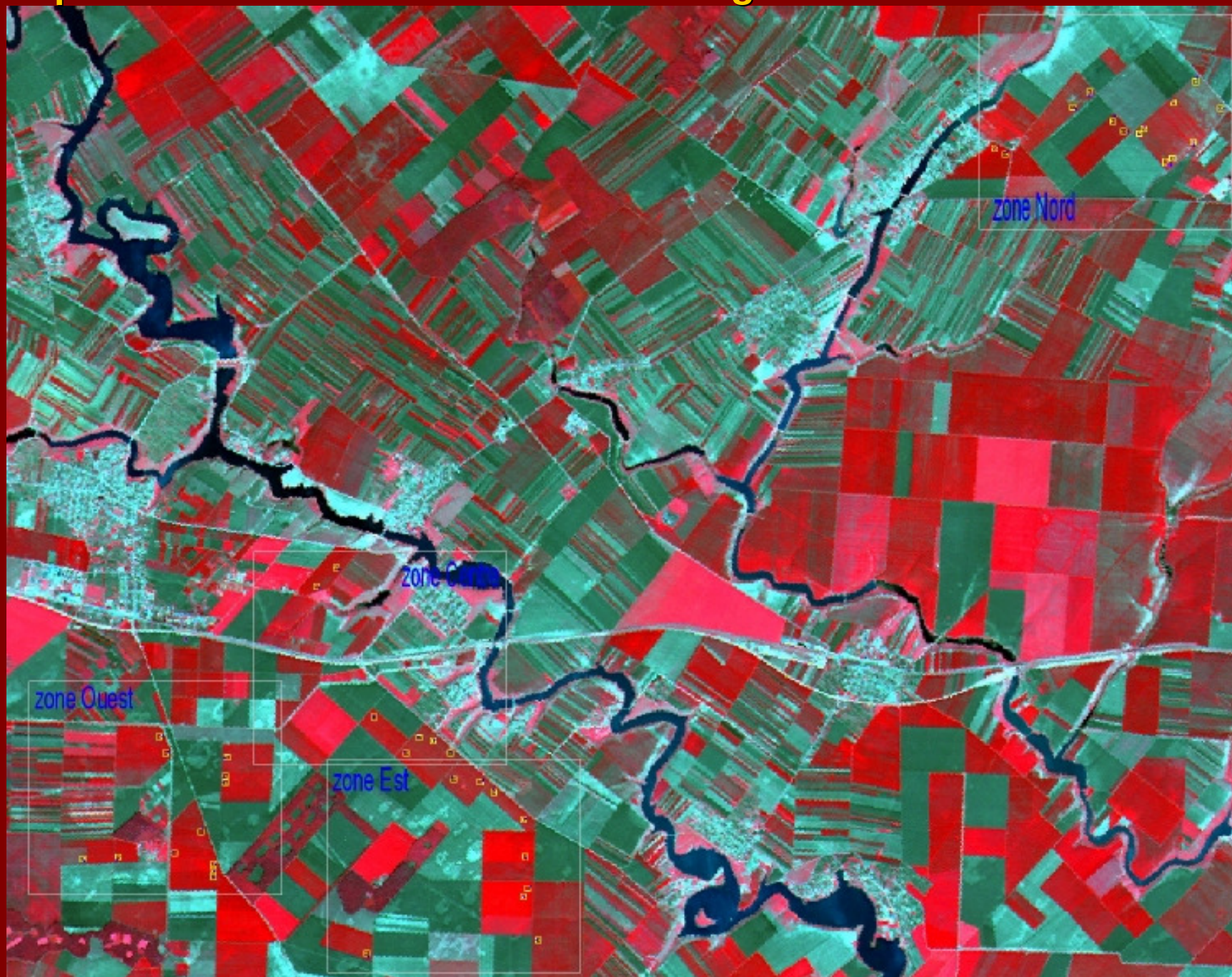
Période de l'expérimentation

- ⌘ 2000-2001: l'année de référence

- ⌘ 10 unités d'étalonnage et 32 unités de validation

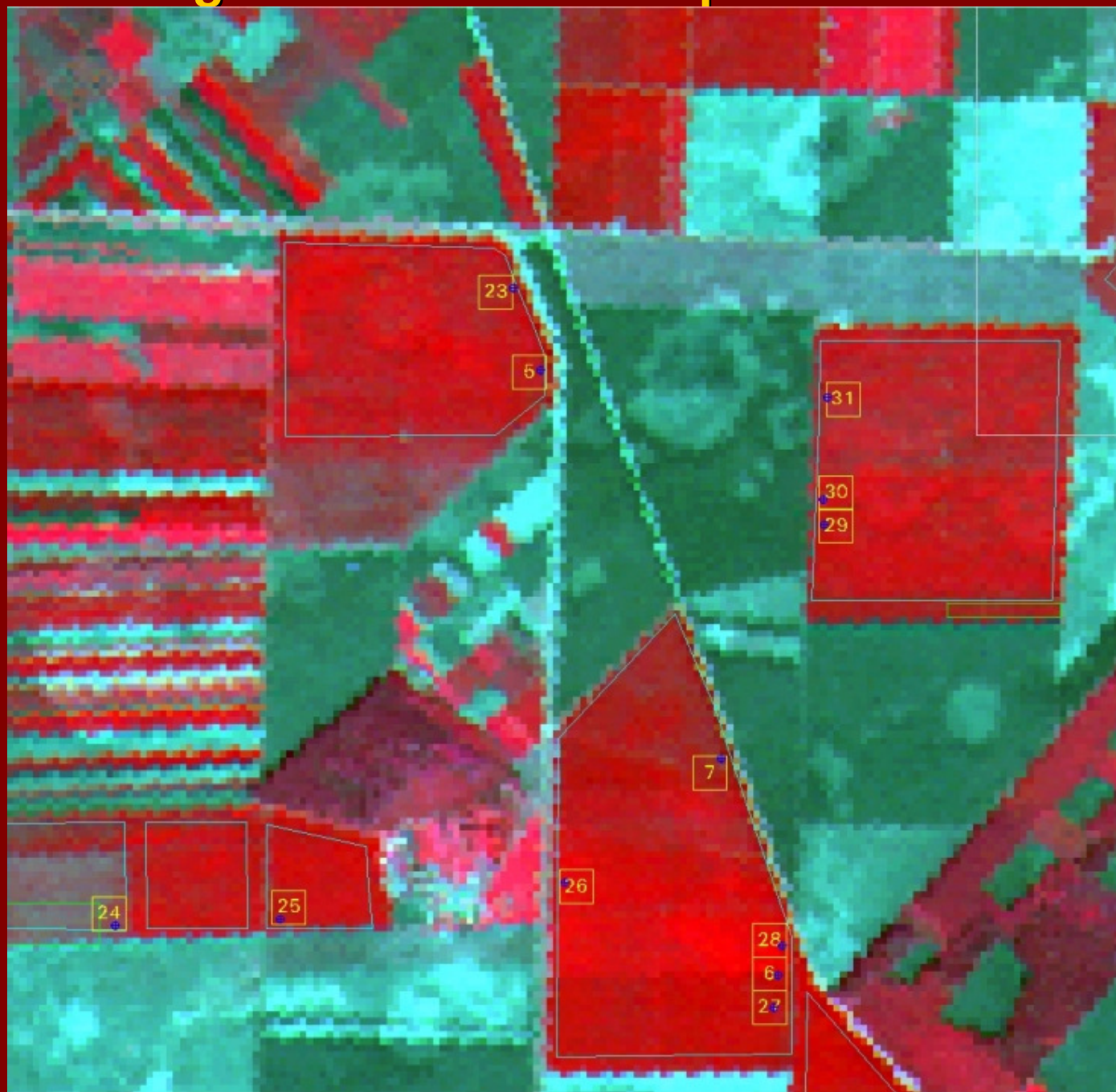
- ⌘ 2001-2003: un nombre d'unités d'échantillonnage plus réduit (pour une étude multitemporelle)

Emplacement des unités d'échantillonnage dans l'année de référence



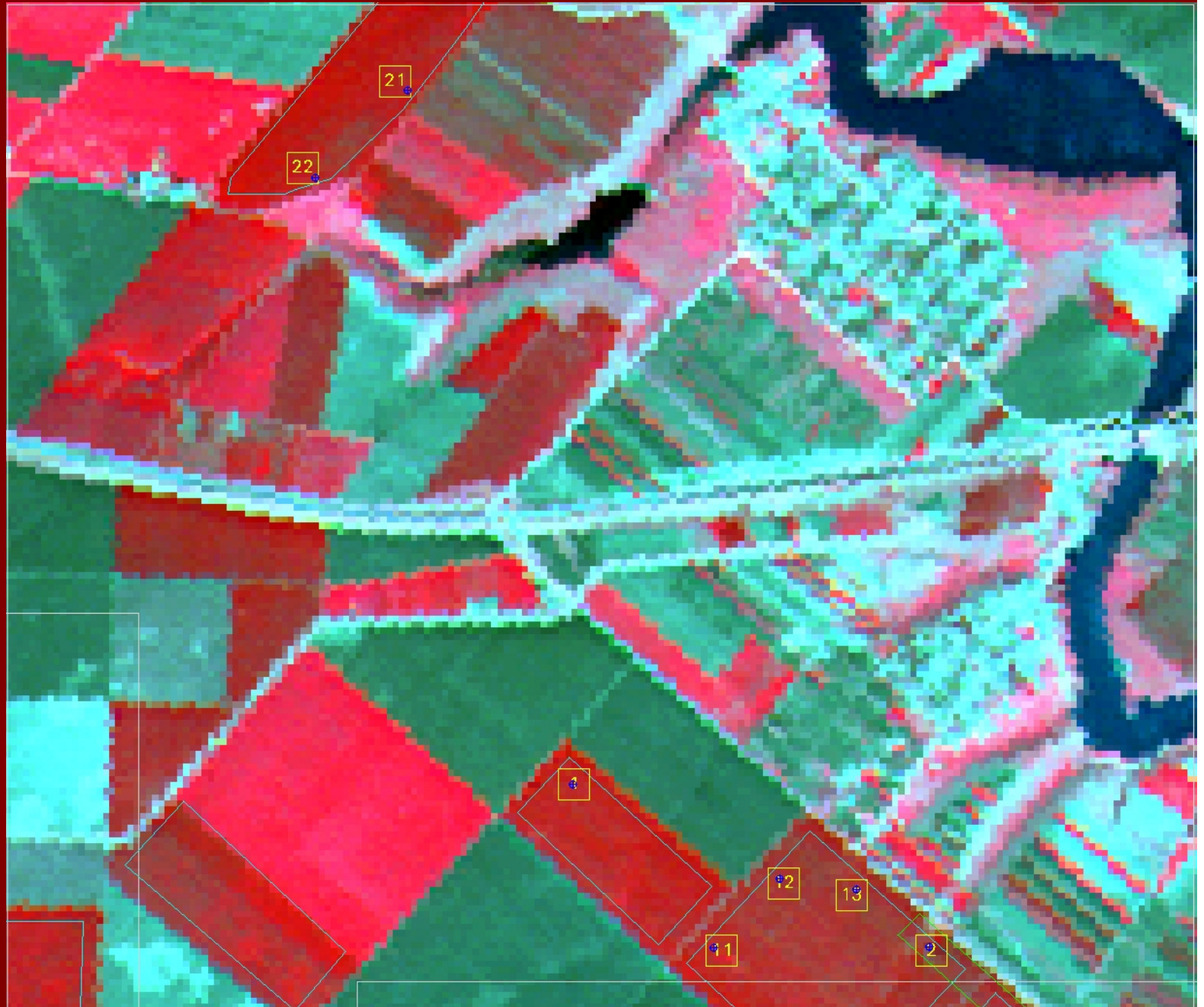
Unités d'échantillonnage et fenêtres correspondantes 5x5

Zone "Ouest"



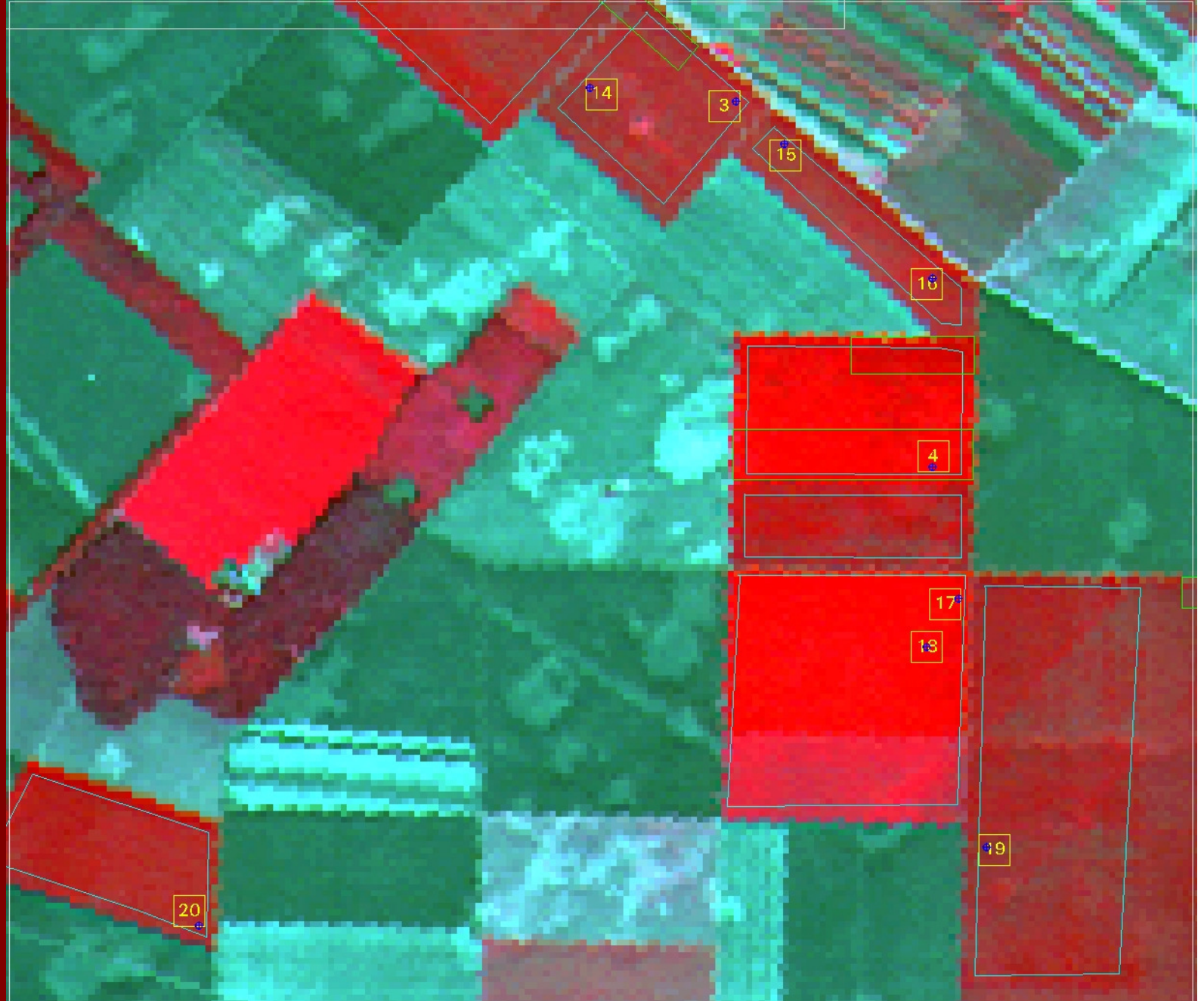
Unités d'échantillonnage et fenêtres correspondantes 5x5 pixels (2/4)

Zone
"Centre"



Unités d'échantillonnage et fenêtres correspondantes 5x5 pixels (3/4)

Zone "Est"



Unités d'échantillonnage et fenêtres correspondantes 5x5 pixels (4/4)

Zone
“Nord”



Caractéristiques des sols mesurées sur les unités d'échantillonnage (UE)

- ⌘ Albédo du sol nu
- ⌘ Profondeur du sol & niveau de la nappe phréatique
- ⌘ Profondeur maximale du système racinaire
- ⌘ pH (eau)
- ⌘ Calcaire total
- ⌘ Capacité d'échange cationique
- ⌘ Taux de saturation en bases échangeable
- ⌘ Azote total
- ⌘ N-NO₃
- ⌘ N-NH₄
- ⌘ Phosphore extractible
- ⌘ Potassium échangeable
- ⌘ Matière organique
- ⌘ Carbone organique
- ⌘ Texture
- ⌘ Densité apparente
- ⌘ Courbe de succion
- ⌘ Capacité au champ
- ⌘ Point de flétrissement
- ⌘ **Profile d'humidité**
- ⌘ **Humidité surfacique**
- ⌘ Rugosité
- ⌘ Résistance à la pénétration
- ⌘ Structure de l'enracinement

(Analyses faites à ICPA Bucarest)



——— Propriétés dynamiques
(mesurées fréquemment)

Caractéristiques des couverts de blé et mesures de plante sur les UE

(Observations et analyses faites à ICDA Fundulea)

#	Caractéristique	Calibration	Validation	Feuille #	Unité de mesure	Échantillonnage spatial	Méthode
1	Pratiques culturales	-	-	1	-	-	cf. Feuille 1 de notation
2	Stage Phénologique	1/7j	1/28j	2	-	notation visuelle sur l'unité	-
3	Hauteur du couvert	1/7j	1/28j	2	cm	5 répétitions	mètre linéaire
4	Infestation (mauvaises herbes, maladies, ravageurs)	1/7j	1/28j	2	-	notation visuelle sur l'unité	cf Feuille 2 de notation
5	Densité plantes levées	s=levée	s=levée	2	-	3 répét. de 2 rangs consécutifs sur 1ml	comptage in situ
6	Indice foliaire (LAI-2000)	1/7j	1/28j	3	m ² /m ²	3 transects (perp. rangs) de 10 mes. "below" et 1 "above"	LAI-2000 & conditions diffuses
7	Indice foliaire (photo hémisphérique)	1/7j	-	3	-	3 transects (perp. rangs) de 5 mesures	appareil Nikon+fisheye & conditions diffuses
8	Contenu en chlorophylle dernière feuille	1/7j	1/28j	3	SPAD	3 répét. de 10 mesures	SPAD 502
9	Contenu en chlorophylle feuilles 2 & 3	1/7j	1/28j	3	SPAD	3 répét. de 10 mesures	SPAD 502
10	Biomasse fraîche totale	1/7j	1/28j	4	g	3 répét. de 2 rangs consécutifs sur 0.5ml	pesée
11	Nombre de tiges	1/7j	1/28j	4	-	3 répét. de 2 rangs consécutifs sur 0.5ml	comptage au laboratoire
12	Poids frais épis	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée
13	Poids frais tiges	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée
14	Poids frais feuilles vertes (plus de 50% de surface verte)	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée
15	Poids frais feuilles jaunes et sénescences	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée
16	Poids sec épis	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée après étuve à 80° pendant 24h
17	Poids sec tiges	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée après étuve à 80° pendant 24h
18	Poids sec feuilles vertes (plus de 50% de surface verte)	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée après étuve à 80° pendant 24h
19	Poids sec feuilles jaunes et sénescences	1/7j	1/28j	4	g	3 répétitions de 10 plantes	pesée après étuve à 80° pendant 24h
20	Azote plante entière	1/15j	s=?	4	g/g	3 répétition de 5 plantes prélevées sur l'échantillon	methode Kjeldhal
21	Longueur totale	1/15j	-	5	cm	3 répétitions de 3 plantes	mesure directe
22	Longueur sommet épis sans barbe	1/15j	-	5	cm	3 répétitions de 3 plantes	mesure directe
23	Longueur tige	1/15j	-	5	cm	3 répétitions de 3 plantes	mesure directe
24	Insertion dernière feuille apparue	1/15j	-	5	cm	3 répétitions de 3 plantes	mesure directe
25	Transition vert/sénescence	1/15j	-	5	cm	3 répétitions de 3 plantes	mesure directe
26	Poids frais feuilles vertes	1/15j	-	5	g	3 répétitions de 3 plantes	pesée
27	Poids sec feuilles vertes	1/15j	-	5	g	3 répétitions de 3 plantes	pesée, après étuve à 80° pendant 24h
28	Surface des feuilles	1/15j	-	5	cm ²	3 répétitions de 3 plantes	mesure longueur et largeur
29	Azote feuilles vertes	1/15j	-	5	g/g	1 échantillon par unité (prélevé sur le mélange des 3 rép)	methode Kjeldhal
30	Nombre d'épis	s=mat.	s=mat.	6	-	6 répétitions de 2 rangs consécutifs sur 1 m linéaire	comptage au laboratoire
31	Poids sec des épis	s=mat.	s=mat.	6	g	6 répétitions de 2 rangs consécutifs sur 1 m linéaire	étuve à 80°*24h, battage épis, pesée grains
32	Poids sec de 50 grains	s=mat.	s=mat.	6	g	50 grains prélevés sur les grains de chaque répétition	comptage 50 grains et pesée
33	Azote des grains	s=mat.	s=mat.	6	g/g	6 répétitions de 2 rangs consécutifs sur 1 m linéaire	méthode Kjeldhal
34	Azote plante entière	s=mat.	s=mat.	6	a/a	6 répétitions de 2 rangs consécutifs sur 1 m linéaire	méthode Kjeldhal

Données spatiales optiques

⌘ Utilisation concurrente des satellites SPOT opérationnels à ce moment

- ☒ Ordre de priorité de la programmation: SPOT 4 > SPOT2 > SPOT 1
- ☒ 300 images acquises sur le site ADAM entre octobre 2000 et juillet 2003
 - ☒ 57 images commandées, dont 39 images dans l'année de référence
- ☒ Prétraitements de haute qualité faits aux CNES

⌘ **Résultat ADAM: Deux séries temporelles d'images SPOT**

« haute répétitivité temporelle et haute résolution spatiale »

- ☒ Images de réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA)
 - (⇒ algorithmes pour identifier certains objets à partir de leur forme et dynamique temporelle / data mining & fusion)
- ☒ Images de réflectance au niveau du sol (TOC)
 - ⇒ caractérisation fine du fonctionnement des cultures de blé

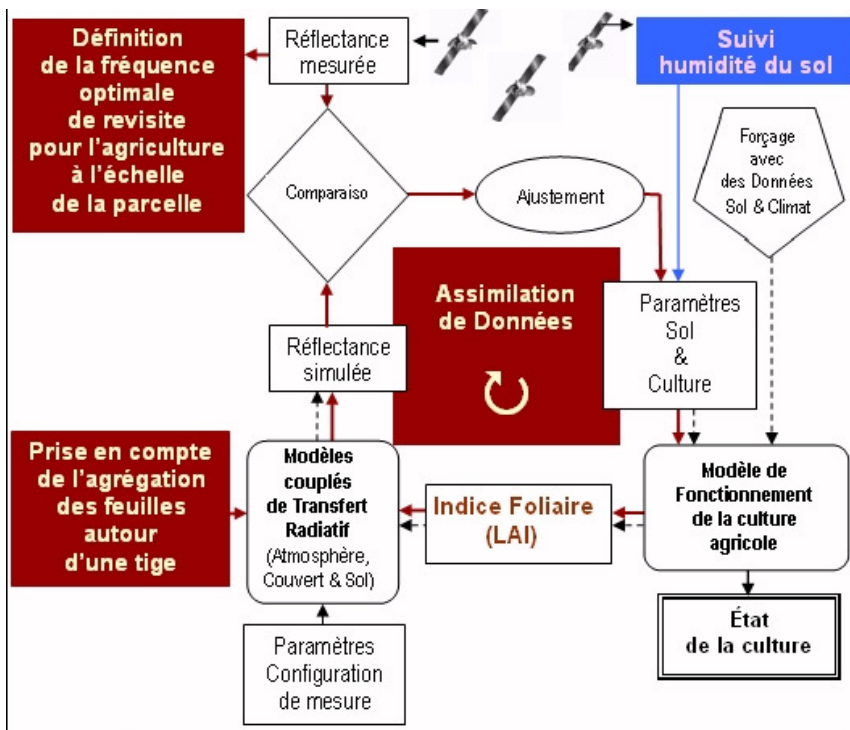
Données spatiales radar

- ⌘ Acquisition programmée en fonction de la dynamique du cycle phénologique du blé ou après les pluies
- ⌘ Données commandées pour l'années de référence
 - ☒ ERS-2: 8 images
 - ☒ Radarsat-1: 6 images
 - ☒ mode d'acquisition à faible incidence
(pour minimiser les effets de la végétation et de la rugosité du sol)
- ⌘ Prétraitements de haute qualité faits aux CNES

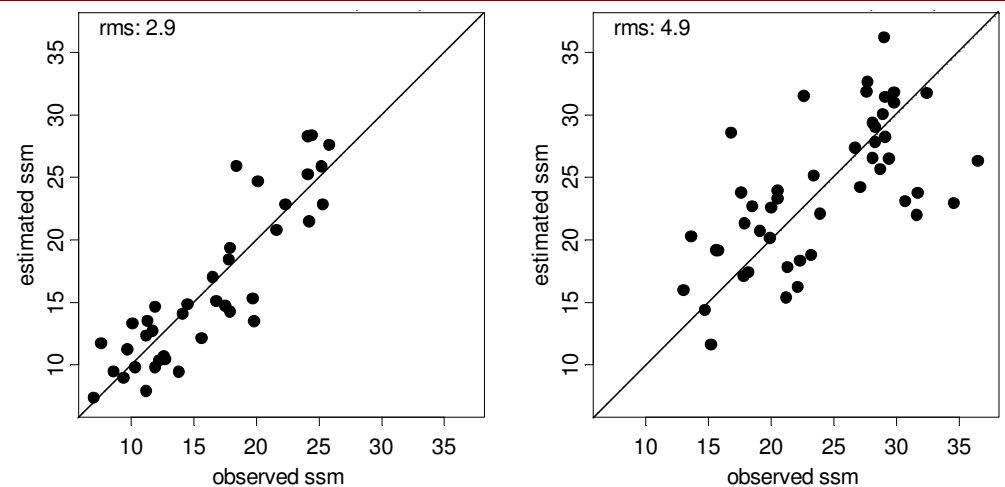
⌘ **Résultat ADAM: Constitution de la première base de données spatiales de référence (CNES, ICPA, INRA et ICDA)**

- ☒ séries d'images optiques corrigées *****
- ☒ images radar corrigées *****
- ☒ données de terrain pour agro-modélisation
- ☒ informations sur le contenu et l'organisation de la base de données ADAM (métadonnées)

⇒ À présent, il y a plusieurs bases de données spatiales de référence (les sites 'Kalideos' du CNES)



Apport des données radar



Comparaison entre les mesures de terrain d'humidité surfacique des sols (ssm, % g/g) et les estimations obtenues par l'inversion du modèle "water cloud" (résultats obtenus pour ERS-2 à gauche, Radarsat-1 à droite)

Résultat ADAM (INRA, ROSA et ICPA)

⌘ Le modèle « water cloud » représente de manière satisfaisante le signal radar rétrodiffusé par les cultures de blé au long du cycle phénologique

⇒ c'est possible de suivre l'humidité surfacique du sol au cours de l'année culturale (y compris quand le terrain est couvert par le blé) avec des estimations acceptables

Préambule

Idéalement, les données radar devraient fournir des informations sur l'humidité surfacique des sols au modèle de fonctionnement.

Pourtant, l'assimilation de ce type de données n'a pas amélioré les résultats de la modélisation agro-physiologique de façon significative (le projet RESEDA, 2000).

ADAM a eu un objectif moins ambitieux ...

Apport de la prise en compte de l'agrégation des feuilles pour l'amélioration de la modélisation du transfert radiatif

Nouveau modèle CLAMP (CLumped Architecture Model of Plant), pour générer des maquettes 3D représentant le couvert d'une manière continue (depuis une répartition uniforme jusqu'à l'état complètement agrégé);

La description de l'agrégation est ajustée à partir de la mesure de la fraction de trou;

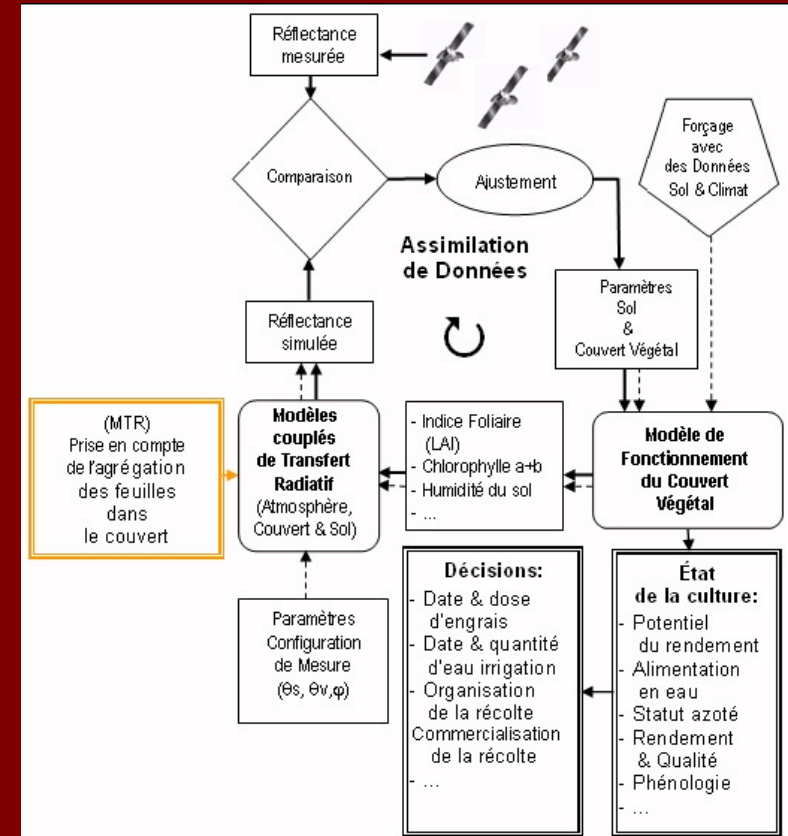
Deux approches considérées pour la modélisation de la fraction de trou: le modèle de Markov et le modèle de Poisson;

Entrées en CLAMP: schéma de semis, densité des plantes, caractéristiques des feuilles (taille, forme et inclinaison) et LAI;

Cultures: blé, maïs, betterave et luzerne.

Résultats ADAM (INRA et ICDA):

⌘ La fraction de trou est sensible à l'angle zénithal de visée, à la distance relative feuille-tige et à la taille relative de la feuille;



⌘ L'effet d'agrégation est insignifiant pour le blé; en revanche, il doit être pris en compte pour d'autres cultures, comme le maïs, ainsi que pour les arbres ;

⌘ Pour des structures agrégées avec de fortes valeurs de LAI, le modèle de Markov est plus performant comparé au modèle de Poisson.

Apport complémentaire

Quelle est la fréquence de revisite pour fournir les informations agronomique qui peuvent être dérivées par assimilation de LAI dans un modèle de fonctionnement ?

Démarche: la simulation de différentes fréquences d'acquisition (de 1 à 30 jours) et l'évaluation des conséquences au niveau de l'estimation de LAI

Hypothèses:

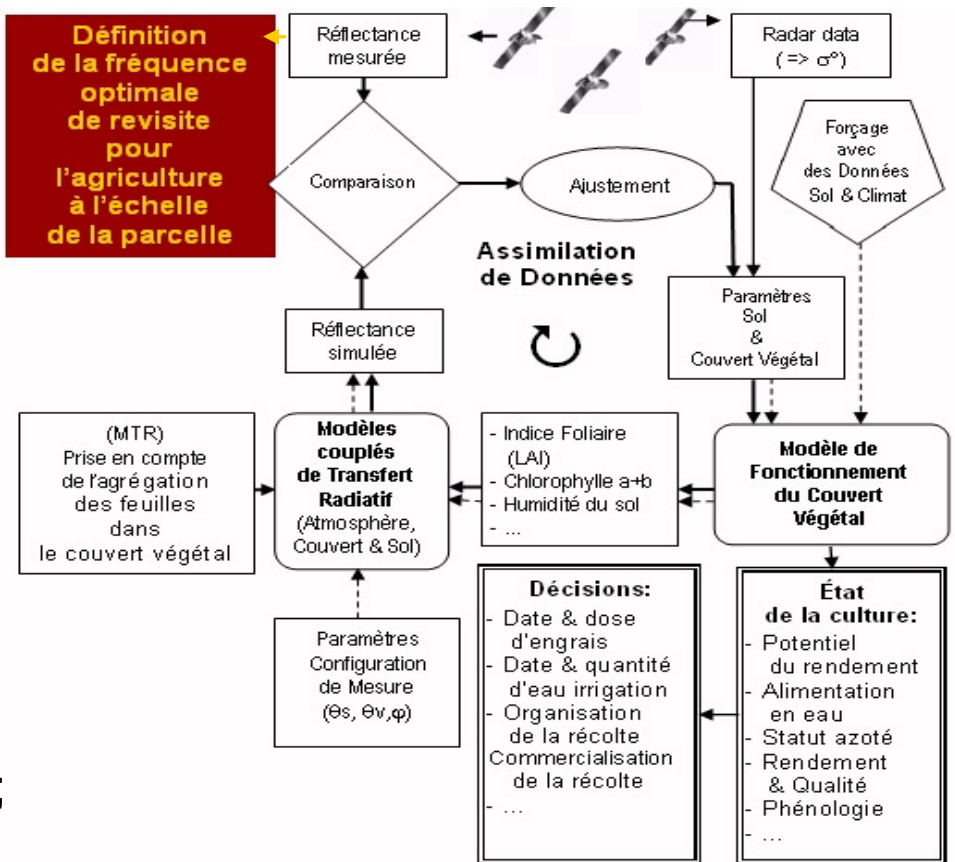
- ☒ 3 niveaux d'erreurs des mesures et d'incertitudes des modèles (10%, 20% & 25%);
- ☒ 2 niveaux de probabilité de l'occurrence quotidienne de nuages (0,5 et 0,7).

Données:

- ☒ série temporelle SPOT TOC
- ☒ données de terrain (LAI)

Méthodes (voir aussi le site Kalideos):

- ☒ modèle d'évolution de LAI (' MODLAI ')
- ☒ régression linéaire multiple (médiane des valeurs de réflectance dans chaque fenêtre 5x5; étalonnage; validation; spatialisation)



Résultat ADAM (ICPA et INRA):

- ⌘ Les erreurs d'estimation de LAI sont faibles et à peu près semblables jusqu'à la fréquence de revisite de 7 jours, indépendamment du niveau d'erreurs et d'incertitudes, ou de la probabilité de nébulosité considérées.

Assimilation de Données Spatiales par Agro-Modélisation

Démarche: Adaptation d'une méthode variationnelle de contrôle optimal, basée sur le calcul du modèle adjoint ;

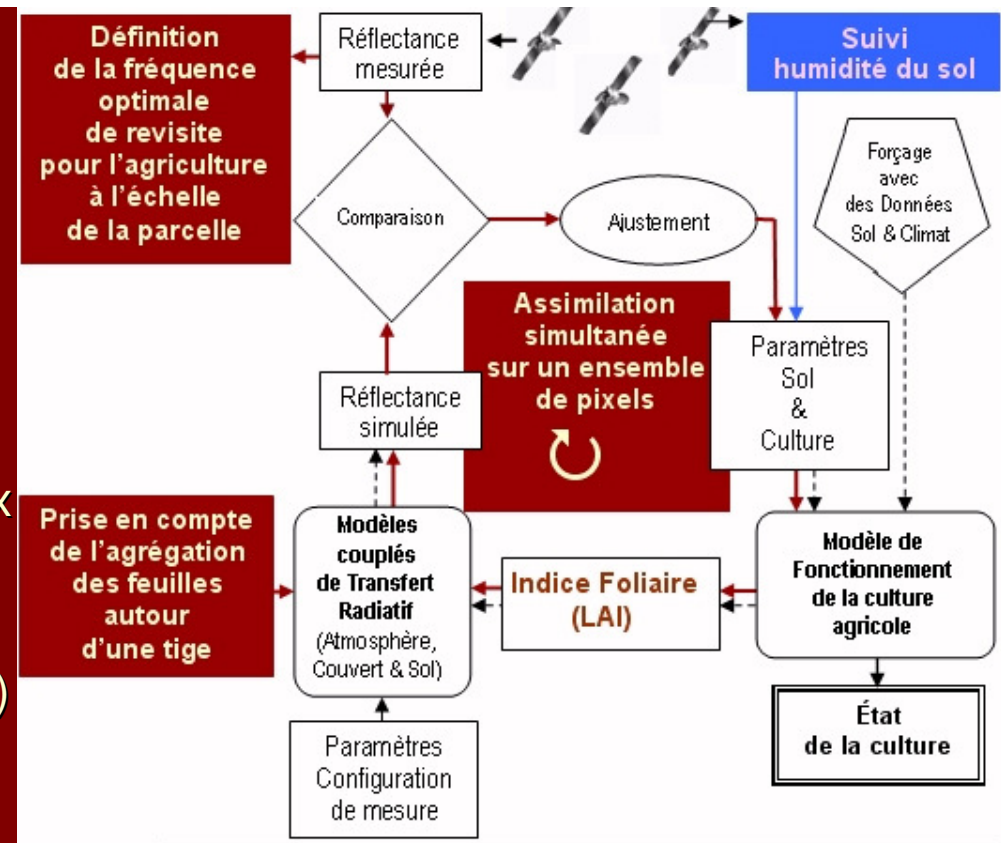
L'adjoint a été calculé pour deux niveaux contrastés de complexité de la description du fonctionnement du couvert :

- ☒ modèle d'évolution de LAI (' BONSAI ')
- ☒ modèle agrophysiologique générique (' STICS ')

Pour accéder aux LAI estimés des données radiométriques (la série SPOT TOC), chacun de deux modèles ci-dessus a été couplé au modèle (MTR) ' PROSAIL ' ,

Résultats ADAM (INRA):

- ⌘ Calcul du modèle adjoint du modèle complexe STICS ;

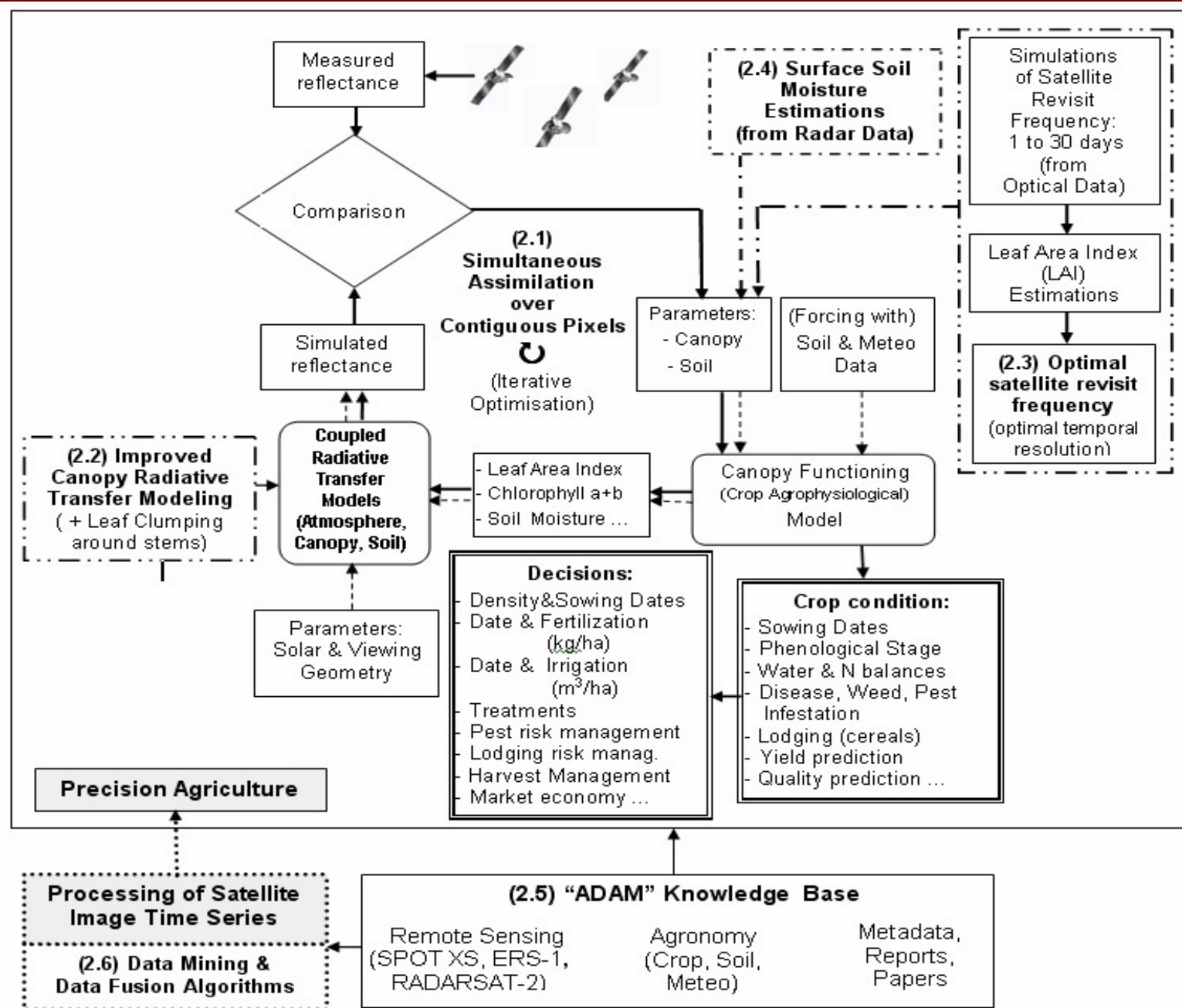


⌘ Stratégie d'assimilation simultanée sur un ensemble de pixels (couverts de la même variété de blé ou situés dans la même parcelle)

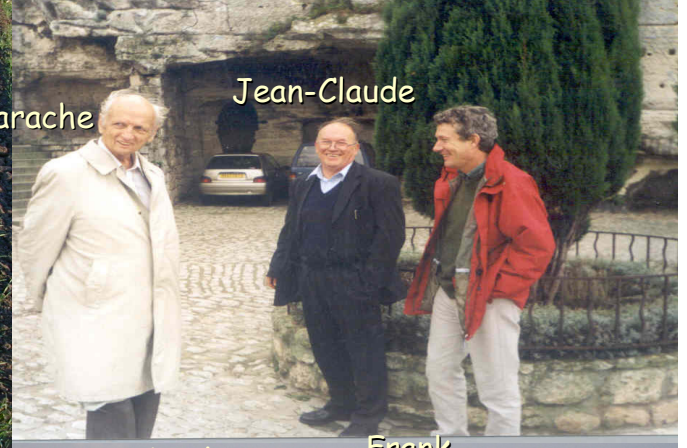
⇒ fréquence optimale de revisite de 15 jours

⌘ Propagation des incertitudes de LAI sur l'estimation du rendement du blé

Kalideos ADAM: Synthesis and follow-up



Remerciements à toute l'équipe ADAM, dont 70 % est ici même !



Remerciements spéciaux



Jean-Claude Favard, Hélène Deboissezon (CNES Toulouse)

Frédéric Baret (INRA Avignon)

A. Canarache (ICPA Bucarest), Gheorghe Sin (ASAS Bucarest)

Marius Piso (ROSA Bucarest)

17 Octobre 2012, CNES (Toulouse)

Merci de votre attention !

