

# Chapitre 3 : Techniques Avancées de Télédétection et SIG pour l'Agriculture de Précision

## 1. Concepts de Base, Avantages et Applications Pratiques

L'**agriculture de précision** est une approche de gestion agricole qui utilise des technologies de pointe pour optimiser l'allocation des ressources (eau, engrais, pesticides) à l'échelle parcellaire, voire sub-parcellaire. Elle repose sur l'intégration de données spatiales (télédétection, SIG), de capteurs in-situ, et de modèles agronomiques.

### 1.1 Concepts Clés

**Variabilité spatiale** - Les propriétés du sol, du micro-climat et de la végétation varient au sein d'une parcelle - Une gestion uniforme est sous-optimale

**Décision adaptée** - Adapter les traitements (engrais, eau, pesticides) aux besoins locaux - Réduire les intrants, augmenter les rendements, protéger l'environnement

**Données spatiales** - Télédétection : images satellites/drones - SIG : intégration et analyse spatiale - GPS/GNSS : géolocalisation précise - Capteurs : humidité, température, couverture végétale

### 1.2 Avantages de l'Agriculture de Précision

- **Économiques** : réduction des coûts d'intrants (20-30%), augmentation des rendements (5-15%)
- **Environnementaux** : réduction des résidus de pesticides/engrais, économies d'eau
- **Techniques** : meilleure prévisibilité, traçabilité des cultures
- **Sociaux** : amélioration de la qualité des produits, valeur ajoutée

### 1.3 Applications Pratiques

- Cartographie des rendements historiques
- Segmentation des parcelles en zones de gestion différenciée
- Irrigation de précision basée sur le stress hydrique
- Épandage variable d'engrais selon les besoins détectés
- Détection précoce des maladies et ravageurs
- Suivi de la maturation et optimisation de la date de récolte

## 2. Collecte de Données Spatiales

### 2.1 Méthodes de Collecte de Données Géospatiales

**Télédétection satellite** - Landsat, Sentinel, SPOT : résolution 10-30 m, fréquence 10-16 jours - Avantages : couverture régionale, séries temporelles longues, gratuit (Sentinel, Landsat) - Limitations : résolution moyenne, dépendance météo

**Télédétection aérienne** - Avions équipés de capteurs - Résolution : 0,5-5 m - Coût plus élevé, flexibilité de programmation

**Drones et UAS (Unmanned Aerial Systems)** - Résolution : 1-10 cm au sol (très haute) - Flexibilité maximale (survol à la demande) - Couverture : parcelle ou exploitation - Temps de vol limité (30 min à 2h) - Données à traiter localement

**GPS/GNSS en temps réel** - Géolocalisation précise des parcelles, limites, éléments - Intégration

directe en SIG

**Capteurs in-situ (proximal sensing)** - Sondes d'humidité du sol, thermomètres, capteurs de rayonnement - Stations météorologiques - Capteurs embarqués dans les tracteurs/moissonneuses (rendement, humidité grain)

## 2.2 Capteurs Embarqués et Drones

### Capteurs Multispect raux pour Drones

- **Micasense RedEdge** : 5 bandes (bleu, vert, rouge, rouge-limite, NIR), résolution au sol : 5-10 cm
- **DJI Phantom 4 Multispectral** : 5 bandes intégrées, compact et abordable
- **Sequoia (Parrot)** : 4 bandes, léger et autonome
- Sortie : index NDVI, carte thermique, etc. en quasi-temps réel

### Capteurs Hyperspect raux

- Centaines de bandes spectrales étroites
- Identification précise des maladies, carence minérales
- Coûteux, traitement complexe, temps d'acquisition long
- Applications avancées : détection du stress hôtier fin, détection de résidus de pesticides

### Capteurs Thermiques

- Caméra infrarouge sur drone
- Détection du stress hydrique via température de feuille
- Identification des zones sèches/trop humides
- Utile pour l'irrigation de précision

### Capteurs de Rendement

- Embarqués dans les moissonneuses-batteuses
- Mesure le poids et l'humidité du grain harvested
- Données géolocalisées en temps réel
- Créent des cartes de rendement détaillées

## 3. Analyse d'Image et Classification

### 3.1 Classification Supervisée

**Processus** : 1. Identification de zones d'entraînement représentatives ( $\geq 20$ -30 pixels par classe) 2. Extraction des signatures spectrales 3. Choix d'un algorithme (Maximum Likelihood, SVM, Random Forest, Deep Learning) 4. Entraînement du modèle 5. Classification de l'image complète 6. Validation sur données indépendantes (matrice de confusion)

**Algorithmes courants** : - **Maximum Likelihood** : probabiliste, rapide, exige distribution normale - **Support Vector Machines (SVM)** : robuste, peu sensible aux dimensions - **Random Forest** : ensemble d'arbres de décision, robuste, gère non-linéarité - **Deep Learning (CNN)** : très performant si données d'entraînement suffisantes

**Applications en agriculture** : - Classification des types de cultures (blé, maïs, orge, légumes) - Discrimination entre sol nu et végétation - Détection des zones non cultivées (routes, bâtiments) - Cartographie de l'état phytosanitaire

## 3.2 Classification Non Supervisée

**Processus :** 1. Définition du nombre de clusters (k) 2. Algorithme k-means ou ISODATA 3. Itération jusqu'à convergence 4. Attribution a posteriori d'une signification aux clusters

**Avantages :** - Pas besoin de données d'entraînement - Découverte de structures non évidentes - Rapide

**Limitations :** - Résultats parfois peu interprétables - Sensibilité au nombre initial de clusters - Moins utilisé en agriculture opérationnelle

## 3.3 Extraction d'Informations Agricoles

**À partir d'images satellite/drone :**

1. **Délimitation des parcelles** : vectorisation des limites de cultures
2. **Calcul d'indices** : NDVI, NDWI pour chaque zone
3. **Détection du stress hydrique** : comparaison NDVI / NDWI, détection des anomalies thermiques
4. **Estimation du LAI (Leaf Area Index)** : relation NDVI-LAI
5. **Évolution temporelle** : comparaison de plusieurs dates pour suivi saisonnier
6. **Anomalies** : identification de zones présentant faible croissance, densité réduite

## 4. Analyse Multi-Temporelle

### 4.1 Surveillance des Cultures

**Calendrier d'acquisition :** - Semis : délimitation des champs ensemencés - Levée (2-3 semaines) : estimation du taux de levée - Tallage/croissance (2-4 mois selon culture) : suivi de la densité, détection des manques - Maturité : évaluation du potentiel de rendement - Sénescence/récolte : optimisation de la date de récolte

**Indices clés :** - **NDVI** : croissance jusqu'au pic puis déclin (courbe saisonnière) - **Intégration temporelle** : aire sous la courbe NDVI = intégration de la croissance - **Stress détection** : anomalie par rapport à la courbe historique

### 4.2 Détection des Changements

**Indices de changement :** - Différence d'images (image  $t_2$  - image  $t_1$ ) - Ratio (image  $t_2$  / image  $t_1$ ) - Analyse multivariée (CVA : Change Vector Analysis)

**Applications agricoles :** - Expansion/contraction des surfaces cultivées - Changement de culture (rotation détectée) - Impact de ravageurs : déclin rapide du NDVI - Phénologie : date de atteint du pic de verdure, date de début de sénescence

### 4.3 Évaluation des Rendements

**Modèles yield-NDVI :** - Relation empirique entre NDVI intégré (ou NDVI max) et rendement réalisé - Validation sur données historiques (5-10 ans minimum) - Prédiction yield avant récolte - Estimation par zone homogène

**Exemple :** Rendement =  $a \times (\text{NDVI intégré}) + b$

**Améliorations :** - Incorporation de variables agronomiques (eau, température) - Modèles par zone de management - Machine learning pour relations non-linéaires

## 5. Modélisation Spatiale et Systèmes de Gestion Agricole

### 5.1 Zonage des Parcelles

**Segmentation (clustering) spatiale :** - K-means géographique sur propriétés du sol + topographie + images - Identification de zones homogènes - Typiquement 3-5 zones par parcelle

**Variables d'entrée :** - Propriétés du sol (texture, pH, matière organique) : cartes pédologiques - Altitude/pente : MNT - Indices spectraux : images - Historique de rendement : cartes passées

**Output :** Zones de management différenciée (ZMD)

### 5.2 Prescription de Traitements

**Carte de prescription :** - Taux variable d'engrais/pesticides/eau selon la zone - Base : modèle agro-environnemental - Exemple : fertilisation  $N = f(\text{sol, eau disponible, culture précédente, cible rendement})$

**Implémentation GPS :** - Électronique au champ reçoit les coordonnées, applique le taux correspondant - Ou guidage d'opérateur en temps réel

### 5.3 Aide à la Décision

**Systèmes d'aide à la décision (DSS) :** - Modèles phénologiques : prédiction du stade de développement - Risque phytosanitaire : modèles de risque (opportunités para site-hôte, conditions météo) - Irrigation : tension hydrique du sol, prévisions météo → recommandation d'irrigation - Récolte : humidité grain, disponibilité moisson → date optimale

**Exemple : Suivi du risque mildiou (Plasmopara viticola)** - Modèle avertisseur : accumulation d'heures d'humidité + température - Alerte lorsque seuil atteint - Recommandation de traitement antifongique

## 6. Intégration de Données SIG avec Données Agronomiques

### 6.1 Cartographie du Sol

**Acquisition de données pédologiques :** - Sondages (carottes) géolocalisées - Analyses chimiques (N, P, K, pH, MO) - Analyses granulométriques (texture) - Interpolation spatiale (krigeage)

**Produits SIG :** - Cartes de propriétés du sol (pH-map, MO-map, etc.) - Cartes de capacité de rétention d'eau - Cartes de potentiel de minéralisation (N disponible)

### 6.2 Cartographie de la Végétation

**À partir de télédétection :** - Cartes d'indices (NDVI, NDWI) - Cartes de classification (type culture, état santé) - Cartes d'estimation de biomasse, LAI - Cartes de stress hydrique (NDVI vs NDWI, température)

### 6.3 Cartographie du Climat

**Données météorologiques :** - Réseau de stations ou interpolation de données régionales - Spatialisation par krigeage/IDW - Cartes de température, précipitation, évapotranspiration - Impact sur la croissance et le risque phytosanitaire

### 6.4 Superposition et Analyse Spatiale

**Opérations SIG :** - Intersection de couches (zones déficitaires en N qui sont aussi sèches) - Buffer autour de routes (application retardée de pesticides) - Analyse réseau (accessibilité, flux d'eau) - Statistiques zonales (rendement moyen par zone de sol)

## 7. Applications Avancées

### 7.1 Irrigation de Précision

**Monitoring du stress hydrique :** - NDVI très baissé par rapport à normal - NDWI réduit (moins d'eau dans la plante) - Température thermique augmentée - Tension hydrique mesurée in-situ

**Système de recommandation :** 1. Calcul du bilan hydrique (pluie - évapotranspiration potentielle) 2. Intégration des données pédologiques (réserve utile) 3. Déficit hydrique estimé 4. Recommandation : apport d'eau si déficit > seuil critique 5. Localisation : cartes de secteurs à irriguer prioritairement

**Impact :** - Économie d'eau 20-30% - Rendement stable/augmenté - Réduction des maladies fongiques (moins de feuillage mouillé)

### 7.2 Agriculture de Conservation

**Principes :** - Minimiser le travail du sol (réduction des labours) - Couvrir le sol (résidus de culture, cultures de couverture) - Diversifier les cultures (rotation)

**Apport de la télédétection :** - Monitorer l'évolution du couvert de résidus sur plusieurs saisons - Évaluer le carbone du sol indirectement (couverture végétale, densité) - Détecter la compaction du sol (croissance réduite dans les zones)

### 7.3 Suivi des Parasites et Maladies

**Détection précoce :** - Indices spectraux peuvent révéler stress bien avant symptômes visibles - Anomalies de NDVI : foyer d'infection identifié - Thermal : foyers de mildiou (humidité locale élevée)

**Localisation précise :** - Cartes d'anomalies superposées à parcelle - Intervention chirurgicale (pulvérisation partielle) plutôt que globale - Réduction des fongicides/insecticides

**Exemple : Mildiou de la luzerne** - Indices spectraux détectent le stress 1-2 semaines avant symptômes - Intervention précoce plus efficace - Économie de produits chimiques

## 8. Mise en Œuvre Opérationnelle

### 8.1 Flux de Travail

1. **Acquisition** : images satellite/drone, données météo, carottes sol
2. **Prétraitement** : géoréférencement, mosaïquage, corrections radiométriques
3. **Traitement** : calcul indices, classification, extraction d'informations
4. **Analyse SIG** : intersection couches, statistiques zonales
5. **Modélisation** : zonage, prescription
6. **Implémentation** : guidance GPS, cartes de prescription au champ
7. **Feedback** : collecte données rendement, validation des recommandations

### 8.2 Outils Logiciels

**SIG :** - QGIS (open source) - ArcGIS (propriétaire) - GRASS (open source)

**Traitement d'images :** - SNAP (ESA, Sentinel) - Erdas Imagine - Orfeo Toolbox (open source)

**Analyse :** - R, Python (spécialisation environnement / agriculture) - Google Earth Engine : analyses satellite sur le cloud

### 8.3 Défis et Perspectives

**Défis actuels :** - Coût initial de mise en place - Formation des utilisateurs - Résolution temporelle insuffisante pour certains phénomènes rapides - Accessibilité des technologies en zones reculées

**Perspectives :** - Satellites Sentinel revisitent tous les 5 jours (deux satellites) - Accélération du traitement par deep learning et IA - Intégration de capteurs IoT au champ - Standardisation des formats et interopérabilité SIG - Connexion directe aux équipements d'agriculture de précision

### Conclusion

La combinaison de la télédétection et des SIG offre un cadre puissant et scientifiquement fondé pour l'agriculture de précision. Ces technologies permettent une gestion adaptée et efficace des ressources agricoles, répondant simultanément aux impératifs économiques, environnementaux et sociaux de l'agriculture durable. L'adoption croissante de ces outils, soutenue par la réduction des coûts de l'imagerie satellite et le développement des drones, laisse augurer une révolution de la gestion agricole territoriale dans la décennie à venir.

### Références Bibliographiques Principales

- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1987). *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2nd ed.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3rd ed.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp.
- Bonn, F., & Rochon, G. (1992). *Précis de télédétection*. Vol. 1.
- DESHAYES, M., & MAUREL, P. (1990). *Remote Sensing and GIS*.
- GUEYE, I. (2013). *GIS and Remote Sensing Applications in Agriculture*.
- Commission Interministérielle de Terminologie de la Télédétection Aérospatiale. (1988).