

Introduction à la télédétection



Raffaele GAETANO
CIRAD – UMR TETIS

GENERALITES SUR L'IMAGERIE DE TELEDETECTION

Qu'est-ce qu'une image?

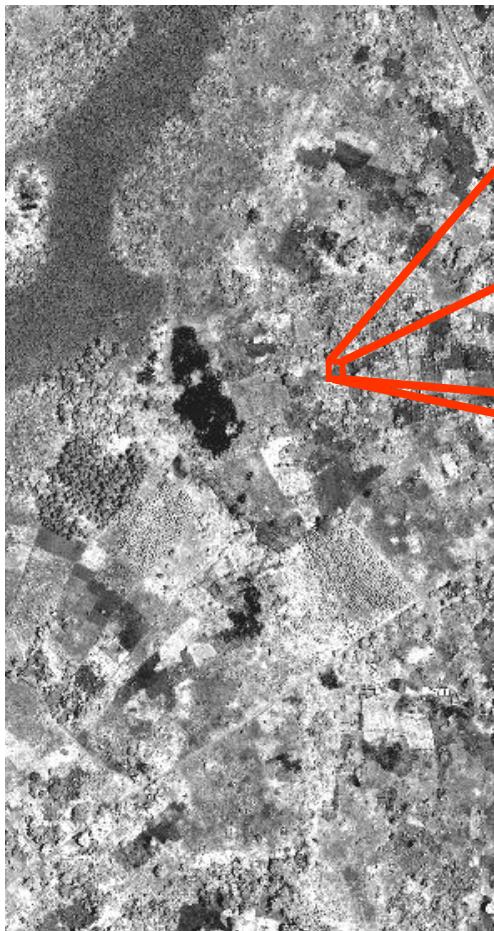
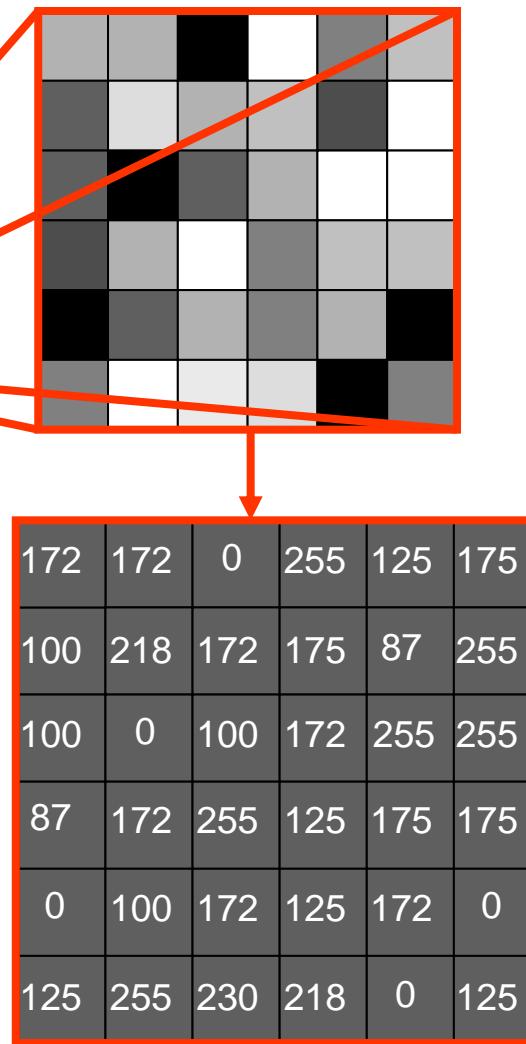


Image mono-bande



Résolution spatiale
=
taille du pixel
=
**plus petit détail
distinguable**

Compte numérique
=
valeur du pixel
=
niveau de gris
=
**intégration (*mélange*)
de toutes les entités
en surface
couverte par le pixel**

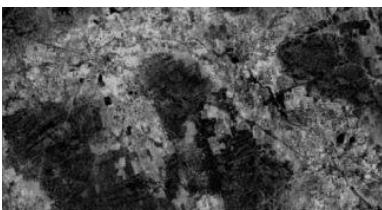


Taille du pixel

Résolution (sub-)métrique
de < 1 m à 4 m

Satélites/résolutions

Très haute résolution spatiale
THRS (Pléiades, Quickbird...)



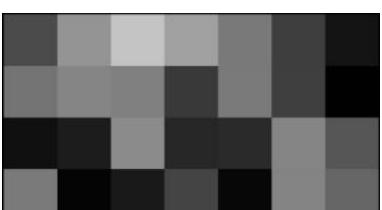
Résolution décamétrique
10 m-60 m

Haute résolution spatiale
HRS (Spot, Landsat, Sentinel-2...)



Résolution hectométrique
250 m - 500 m

Moyenne résolution spatiale
MRS (MODIS, MERIS ...)

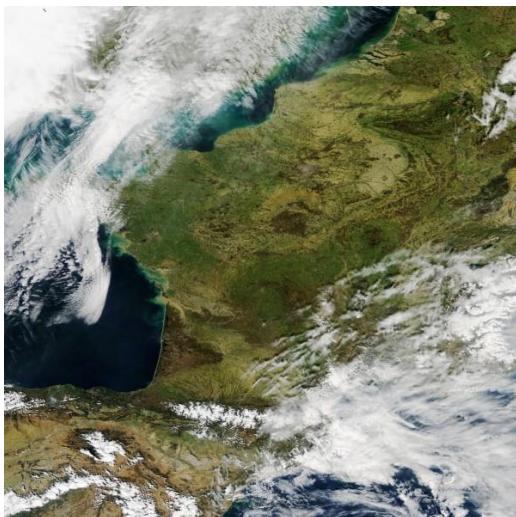


Résolution kilométrique
1000 m

Basse résolution spatiale
THRS (NOAA-AVHRR, VGT...)

7 km

- Comment choisir la résolution spatiale ?
 - Compromis entre la taille du pixel et l'étendue de la zone d'étude



Echelle globale/regionale
ex. MODIS (250 m à 1 km)



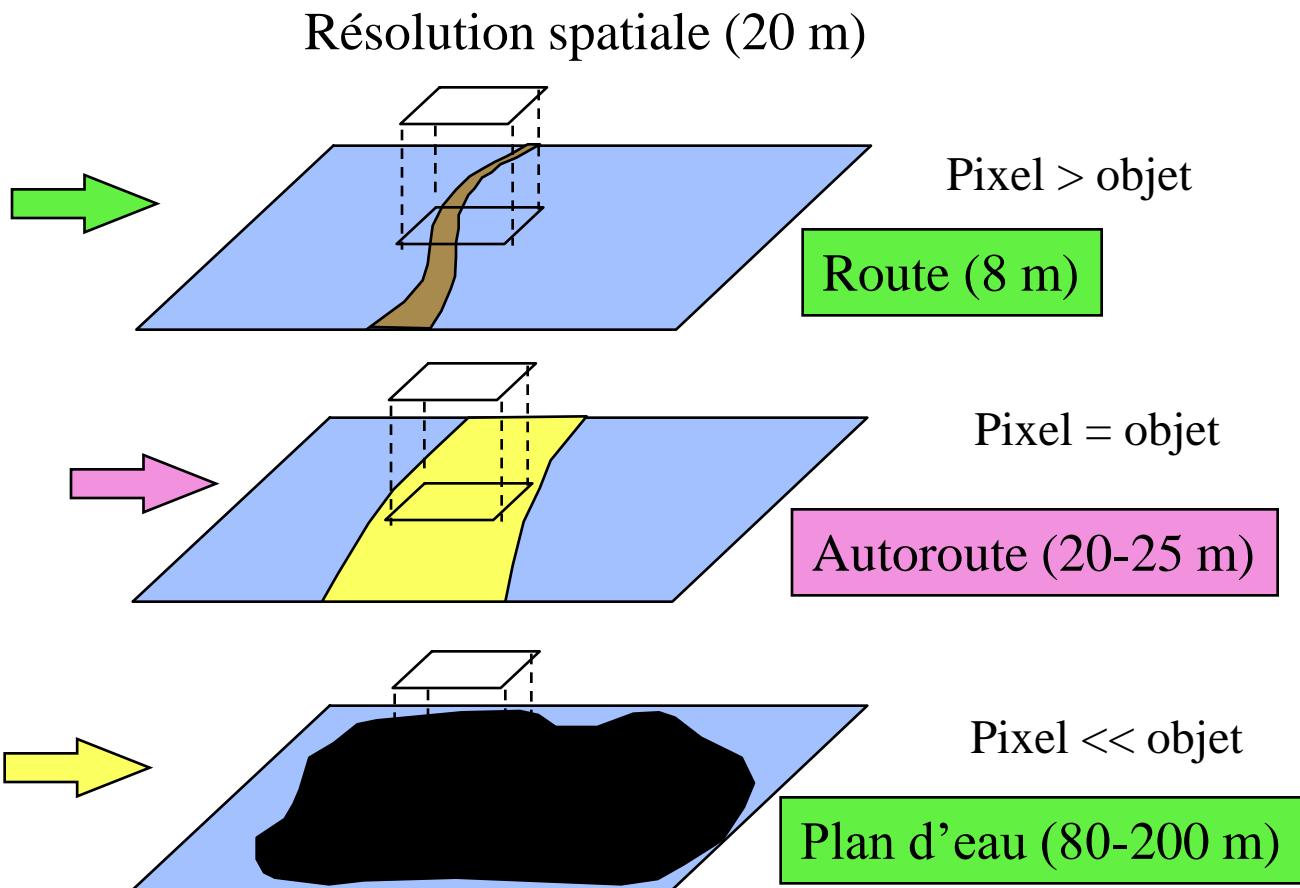
Echelle locale (territoires)
ex. LANDSAT8 (15 m à 30 m)



Echelle locale (individus)
ex. SPOT6/7 (1,5 m à 6 m)

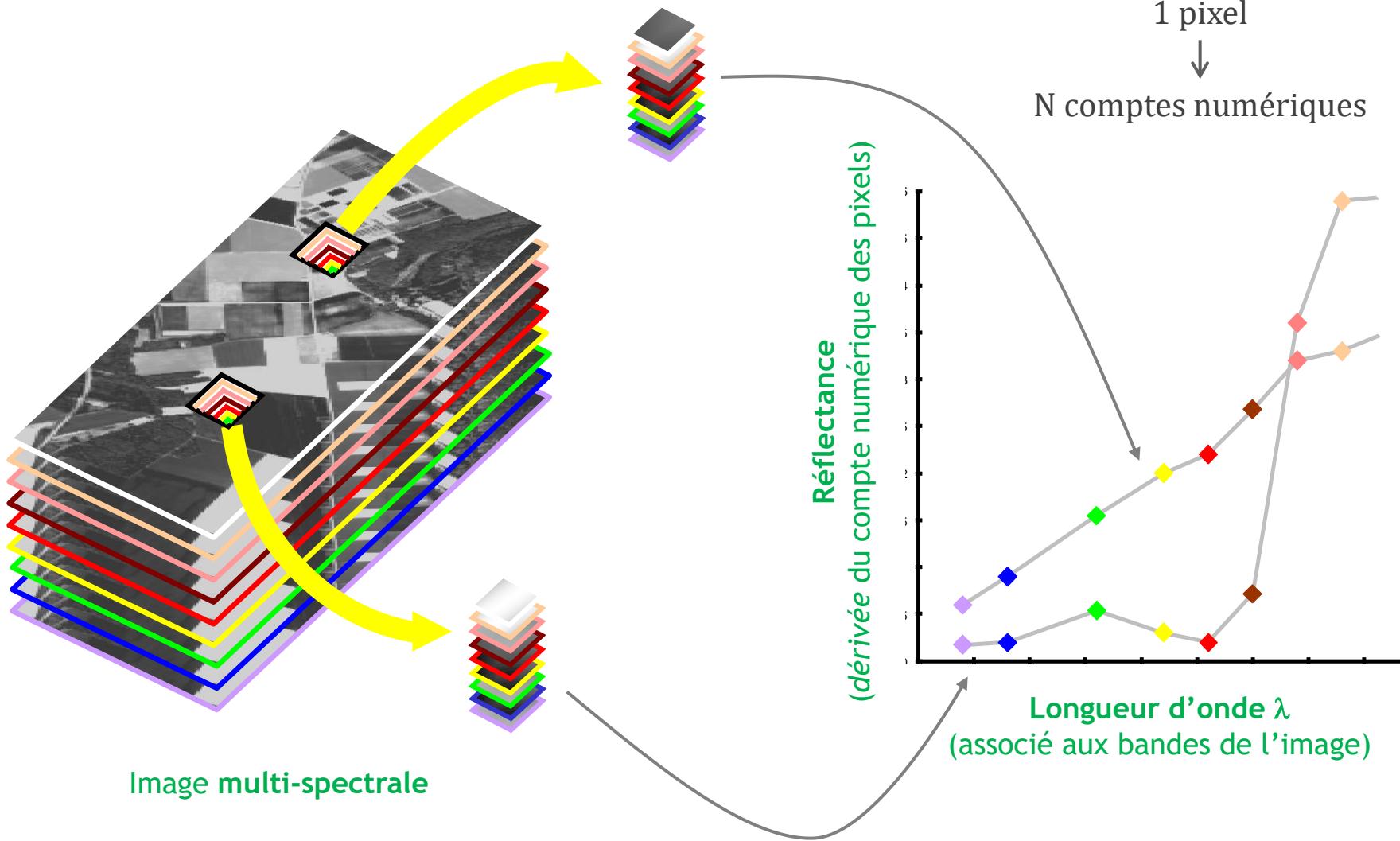
- En particulier, la taille du pixel doit être suffisante à extraire l'information demandée par chaque application...

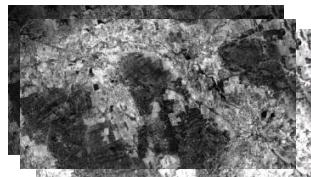
Détection



Source : J.M. DEMARD

La résolution spectrale en télédétection





Nombre de bandes

< 10 (ex. R + G + B + NIR)

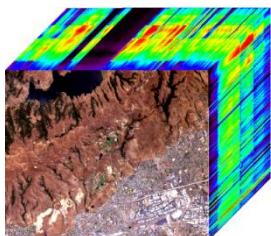
Capteurs/résolutions

**Images multi-spectrales
(Pléiades MS, SPOT MS, ...)**



> 10 et < 100

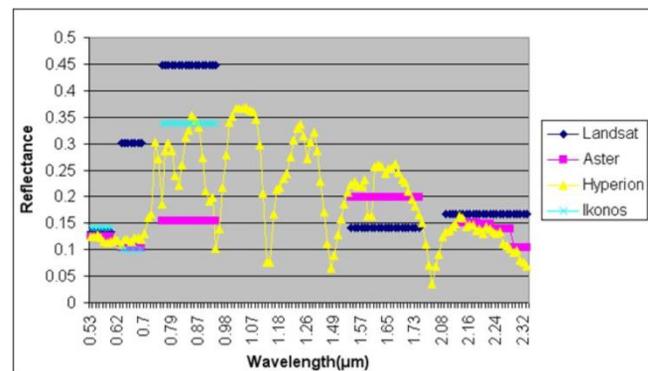
**Images super-spectrales
(Venus, ...)**



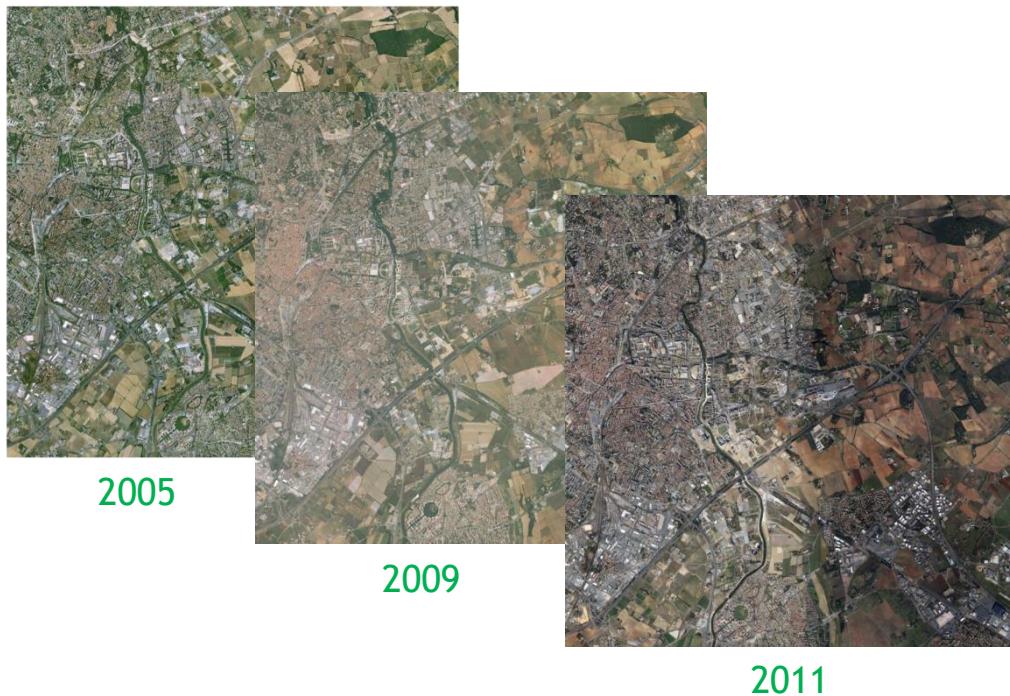
> 100

**Images hyper-spectrales
(Capteurs aériens – AVIRIS, HYPERION, ...)**

Même couverture spectrale mais
densité (précision) différente



La résolution temporelle en télédétection



1 pixel
↓

N^*T comptes numériques
(N bandes, $T = \#$ dates de la série)

Dépends de la répétitivité des acquisitions...

- Aérien → selon la **disponibilité de l'avion**
- SPOT → entre 2,5 et 26 jours
- LANDSAT → 16 jours
- ...
- Vénus → 1 à 2 jours
- NOAA → 4 fois par jour

...des conditions d'acquisition...

- **Couverture nuageuse**
- **Conflits de programmation**
- ... et des applications (jeux de données)
- **Evolution urbaine → mois, années**
- **Monitorage de ressources → semaines, mois**
- **Suivi agricole → jours, semaines**
- ...

Exemple d'imagerie à très haute résolution spatiale (THRS) : imagerie PLEIADES

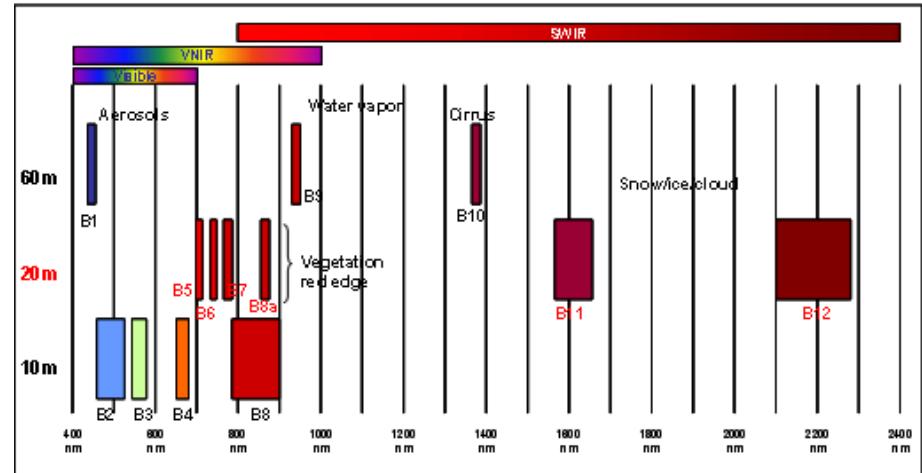


- Capteur optique multi-résolution
 - Bande panchromatique (PAN) à 50 cm
 - Image multi-spectrale (XS) à 2 mètres
- 5 bandes spectrales au total
 - PAN : 480-830 nm
 - MS Blue : 430-550 nm
 - MS Green : 490-610 nm
 - MS Red : 600-720 nm
 - MS Near Infrared : 750-950 nm
- Modalité d'acquisition
 - Programmation
 - Fauchée de 20 km
- Principalement utilisé pour le suivi des **zones urbaines et péri-urbaines** (échelle du bâtiment), **ponctuellement en agriculture et environnement** lorsqu'une une précision élevée est nécessaire (parcellaire agricole, inventaire forestier, etc.)

Exemple d'imagerie à haute résolution spatiale (HRS) : imagerie SENTINEL-2

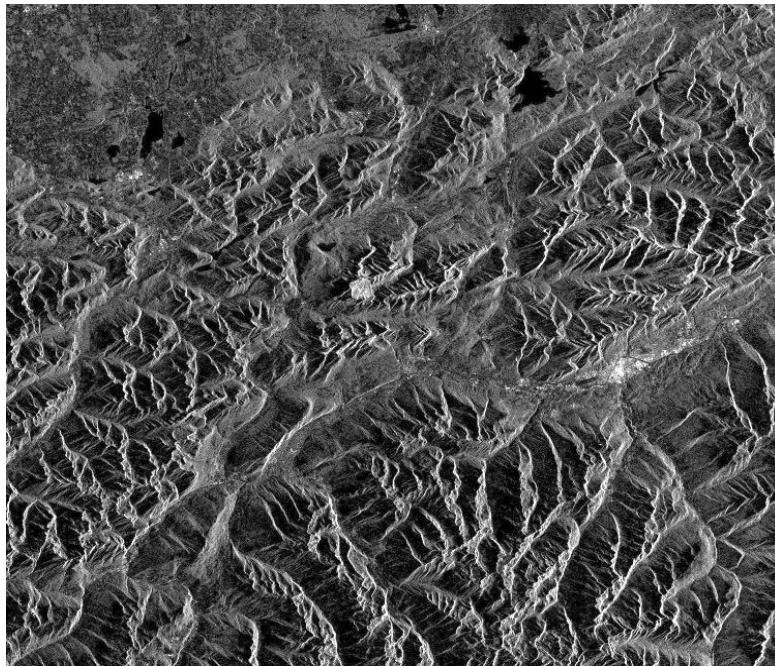


- Capteur optique multi-résolution

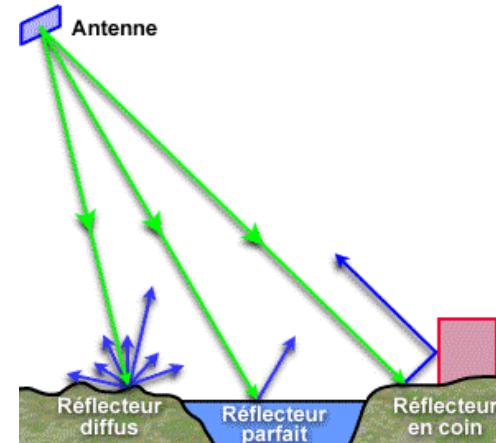


- Modalité d'acquisition
 - Continue (à l'échelle globale)
 - Fauchée de 290 km
 - Répétitivité de 10 jours (\rightarrow 5j bientôt)
- Produit conçu pour le **suivi de la végétation** (estimation des rendements agricoles, suivi des forêts, détection de changements environnementaux, ...) à l'échelle du monde entier dans un contexte opérationnel.

Autres types d'imageries : imagerie radar (SAR)



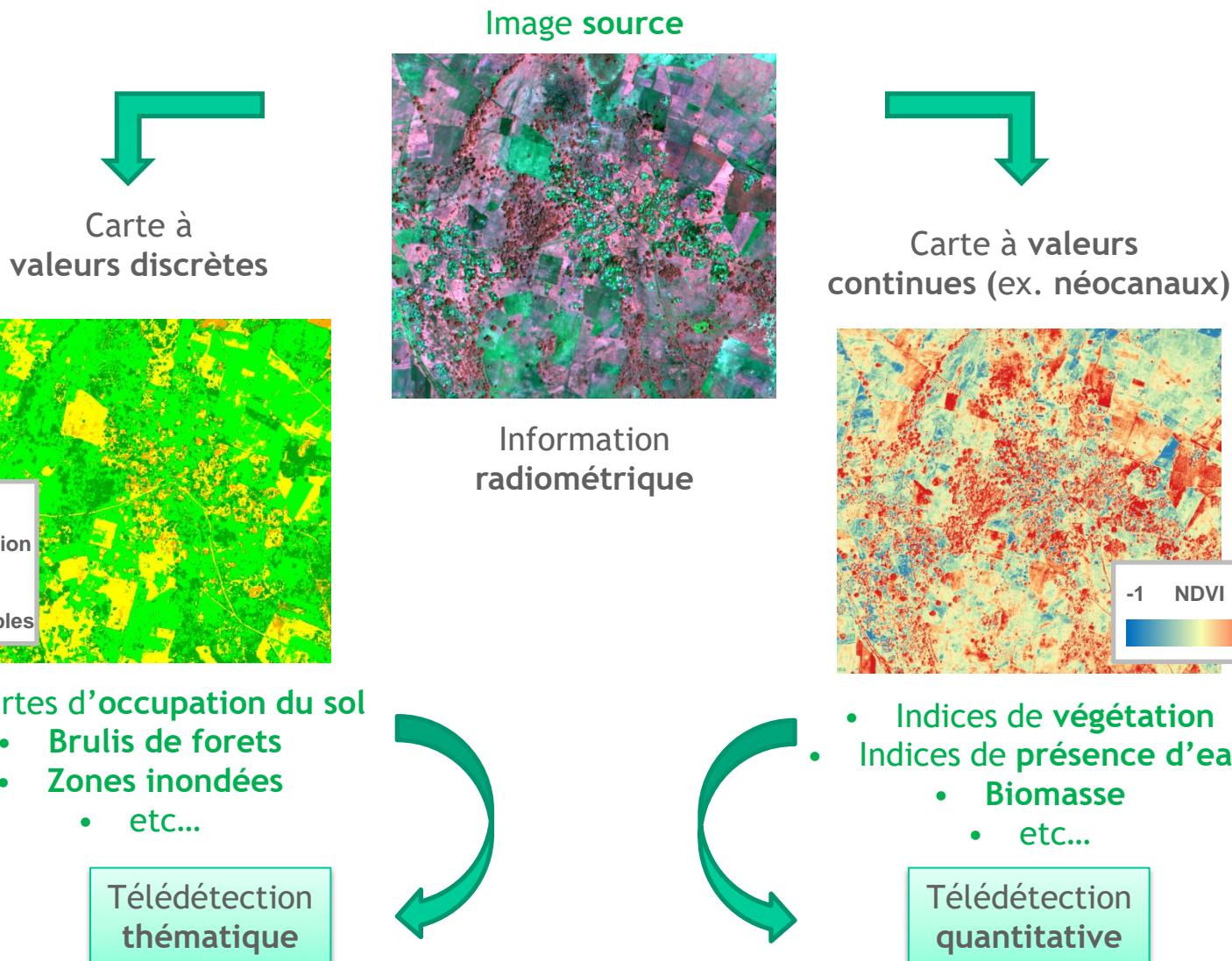
- Imagerie basée sur **capteur actif**



- Longueurs d'ondes du *micron au mètre*
 - Informations sur la **structure** des surfaces (pas sur les matériaux comme pour l'optique)
- Signal physique très complexe, nécessitant des **prétraitement spécifiques**, souvent utilisé pour extraire de l'information topographique (ex. **SRTM**)

- Dans ce cours, nous nous concentrerons uniquement sur l'imagerie issue de **capteurs optiques** (THRS, HRS)
 - Intérêt vers les **propriétés spectrales** des surfaces (phénologie de la végétation, caractéristiques des sols, aspects des entités, ...)
- Les produits livrés par les fournisseurs d'images satellitaires **ont uniquement un niveau « base » de prétraitement**, générique vis-à-vis des applications
- Introduction aux **outils** et aux **méthodologies** de base pour le traitement et l'analyse des images

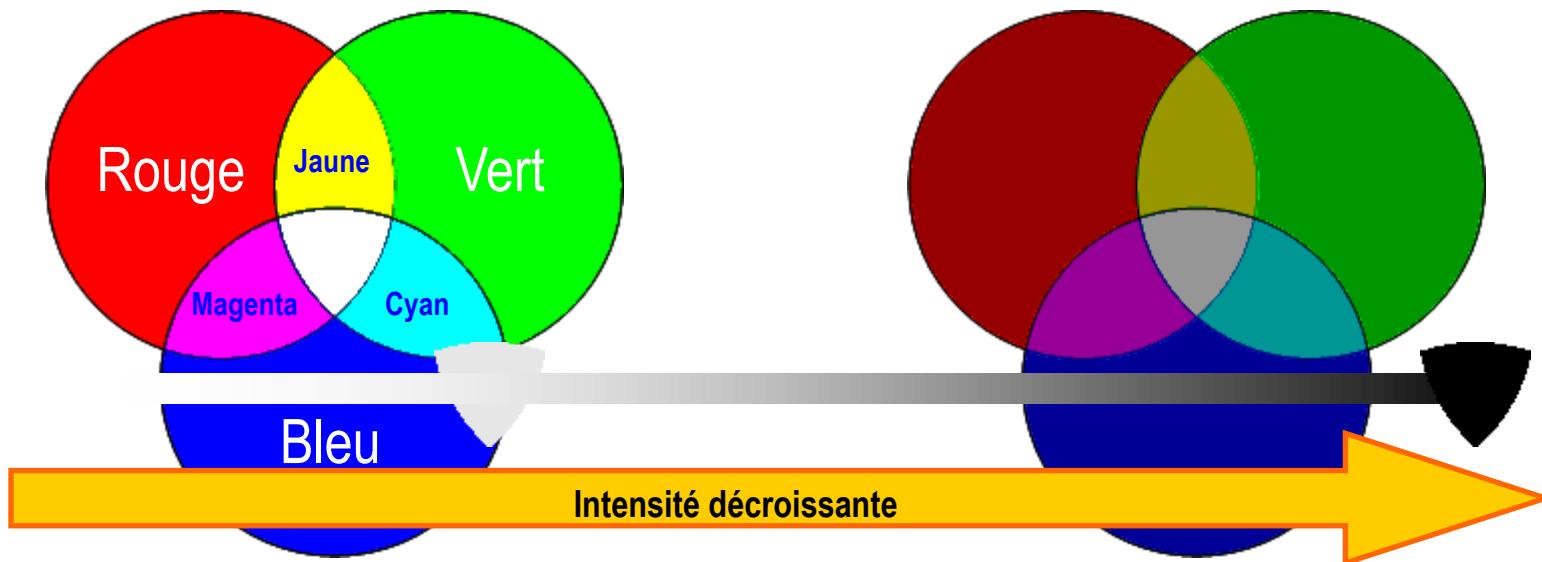
Extraction d'information d'images de télédétection



PRETRAITEMENT DES IMAGES

- Écran = 3 plans couleur (ex. Rouge, Vert, Bleu)
- Image = n plans (canaux ou bandes)

Synthèse additive : l'affichage des couleurs est obtenu en ajoutant les 3 couleurs primaires



- L'affichage d'une image se construit par l'affectation d'un canal à chaque plan couleur

Affichage d'un canal

- Lorsqu'on affiche **un seul canal**, il est tout simplement **affecté à tous les plans couleurs de l'écran** :

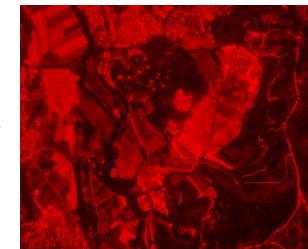
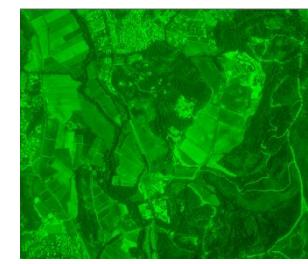
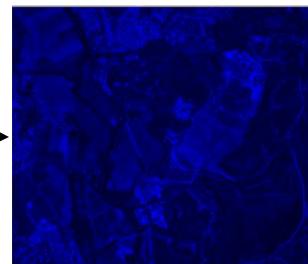
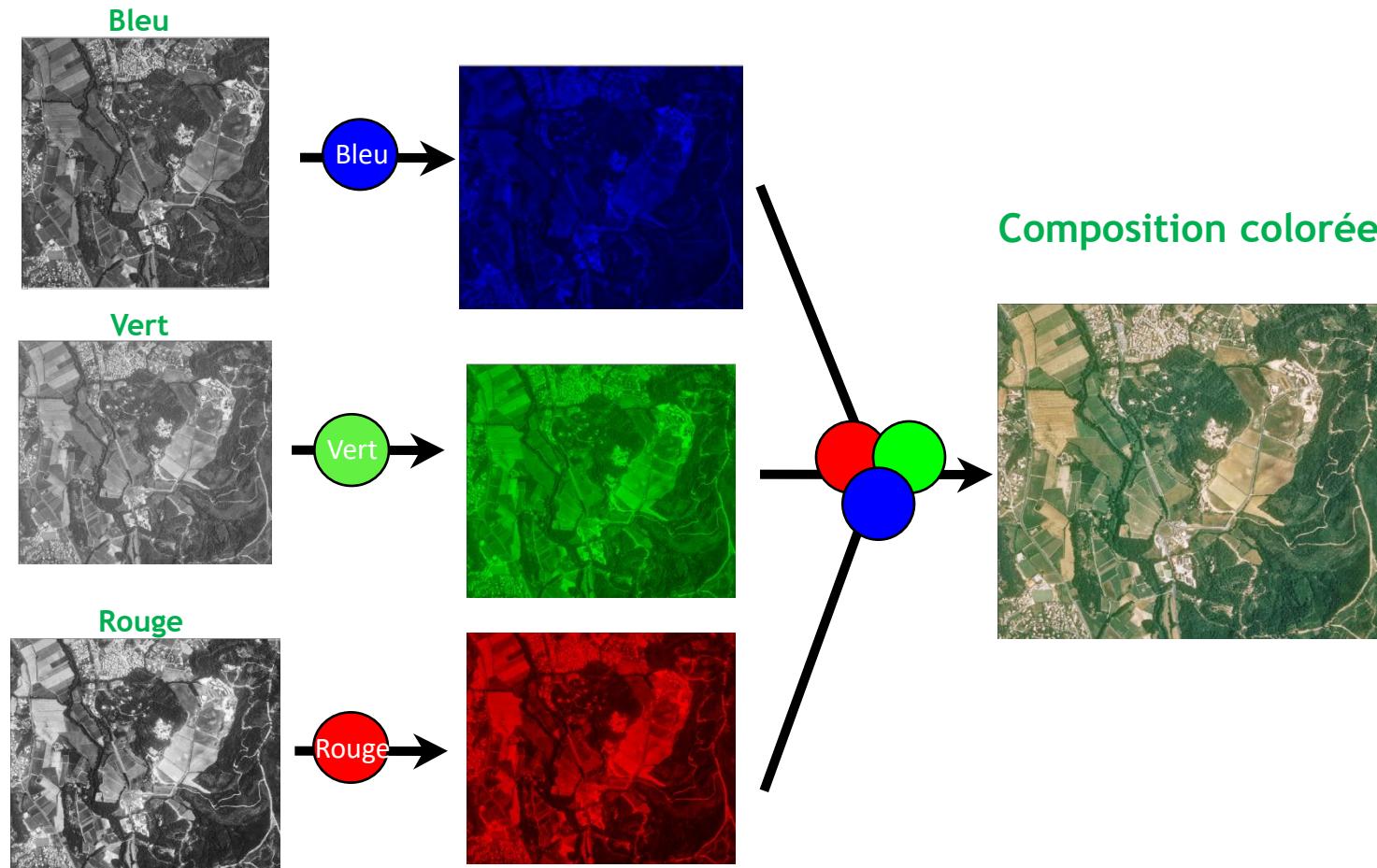


Image en
niveaux de gris



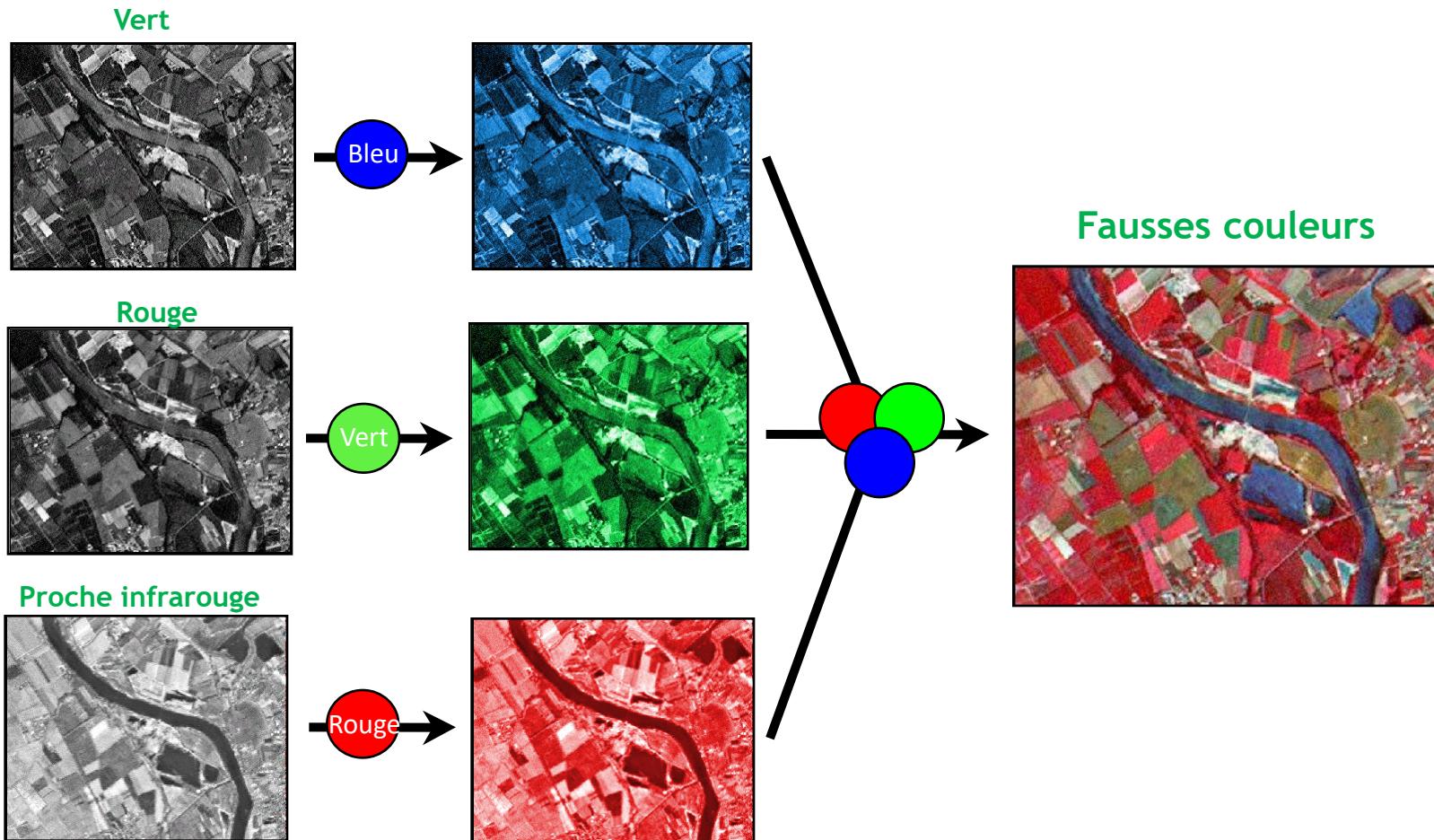
Compositions colorées : couleurs naturelles

- Si des canaux d'image correspondant aux **fréquences du rouge, vert et bleu sont disponibles**, leur affectation aux plans écran correspondants donne celle qu'on appelle une **composition en couleurs naturelles**

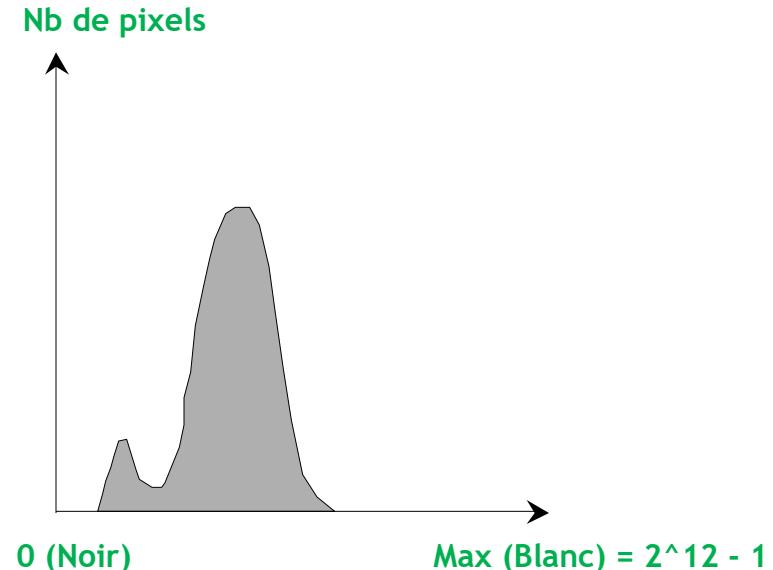
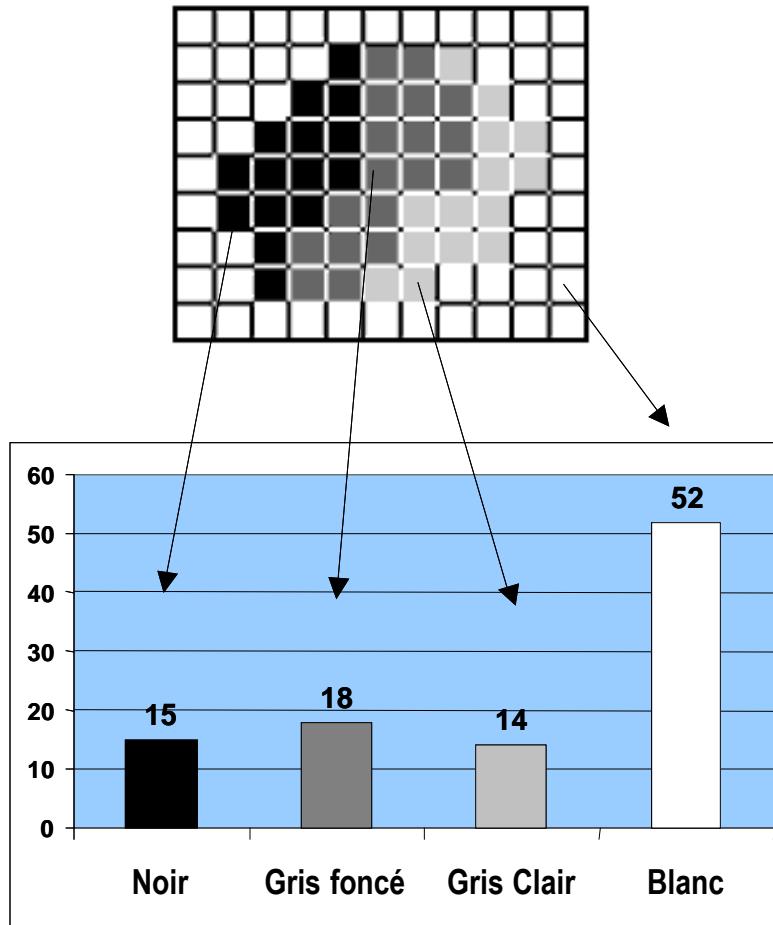


Compositions colorées : fausses couleurs

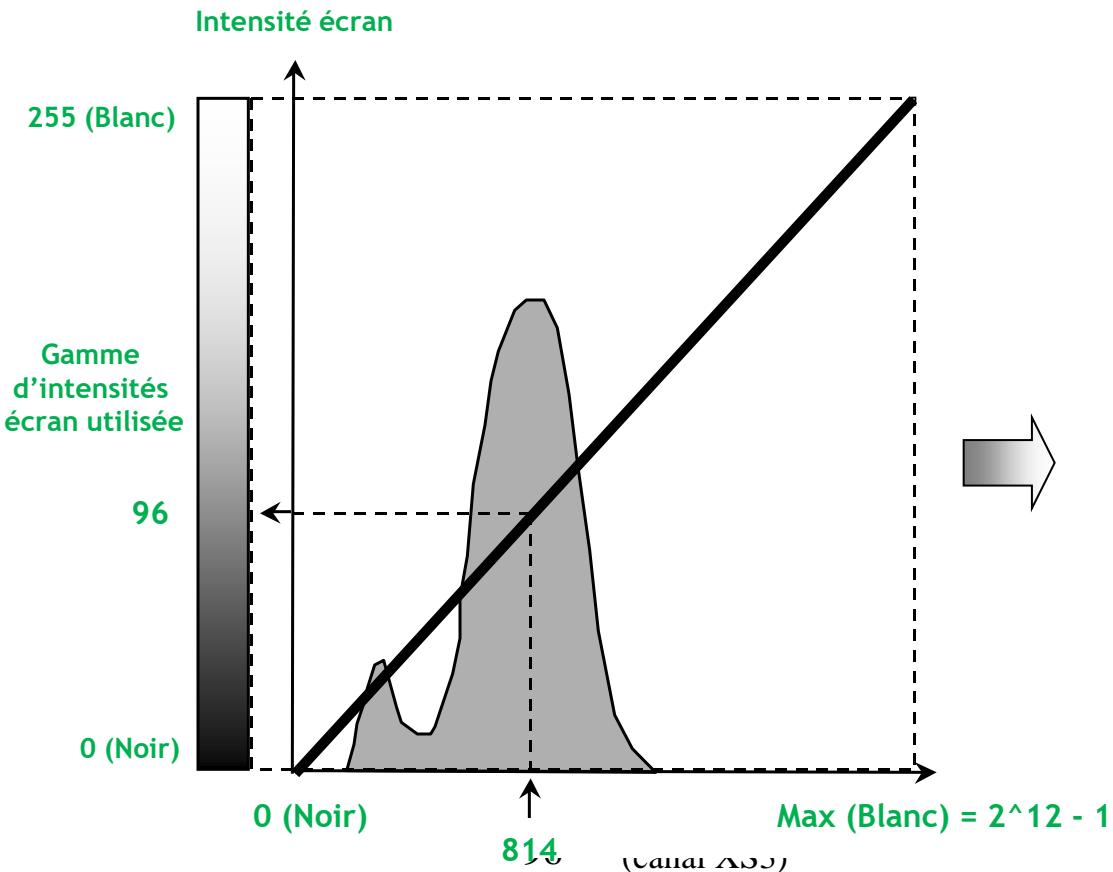
- Une composition en « **fausses couleurs** » est réalisée en affectant des bandes aux plans de façon **non homologue** (non-RVB vers RVB)
- Sauf si indiqué différemment, **fausses couleurs** : (V, R, PIR) → (B,V,R)



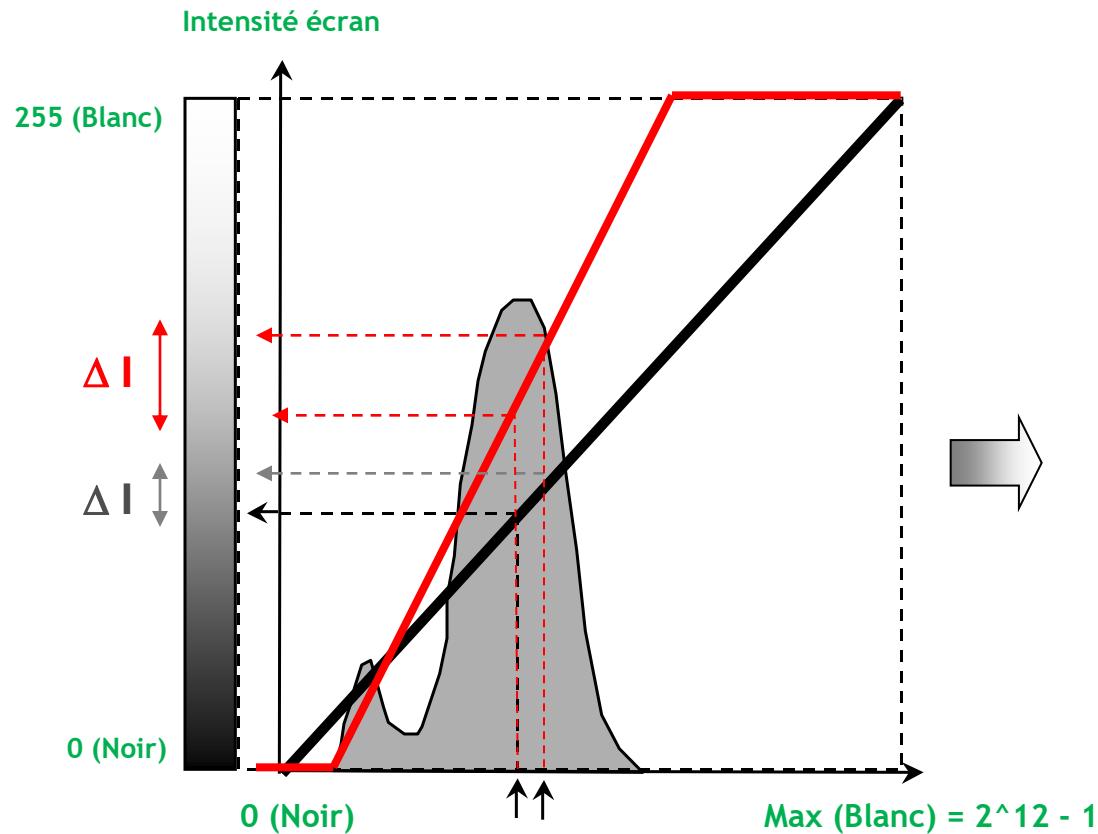
- L'**histogramme** d'un canal compte **combien de fois un pixel a une valeur donnée** à l'intérieur de la gamme disponible :



- Pour l'affichage, il faut également affecter **chaque valeur d'intensité de du canal à une intensité d'écran correspondante**
 - ex. *correspondance entre le min et le max des deux gammes :*



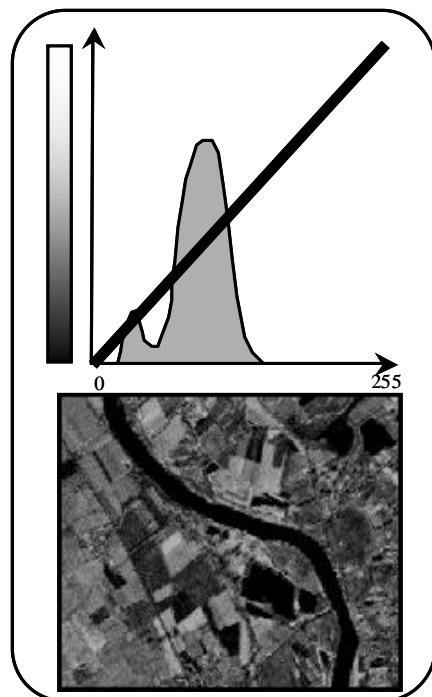
- Rehaussement des contrastes : min/max des données disponibles vers min/max de la dynamique de l'écran



Affichage

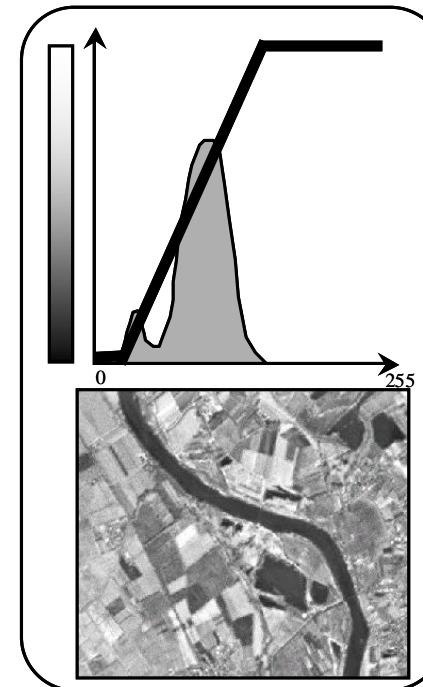


Rehaussement des contrastes : fonction de transcodage

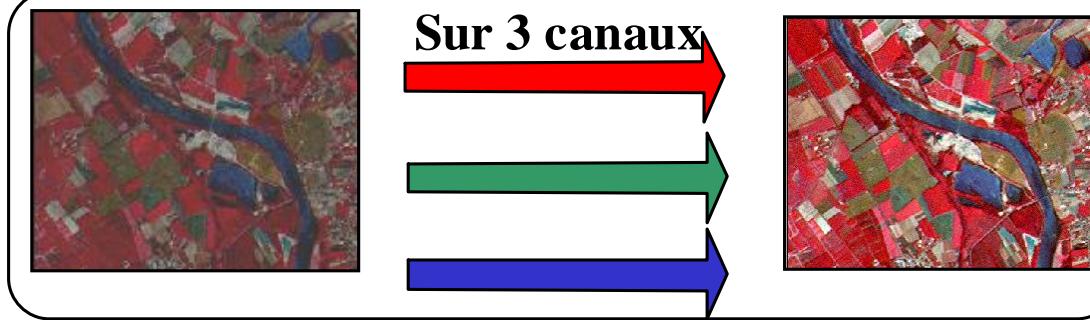


Etalement de dynamique

Sur 1 canal donné

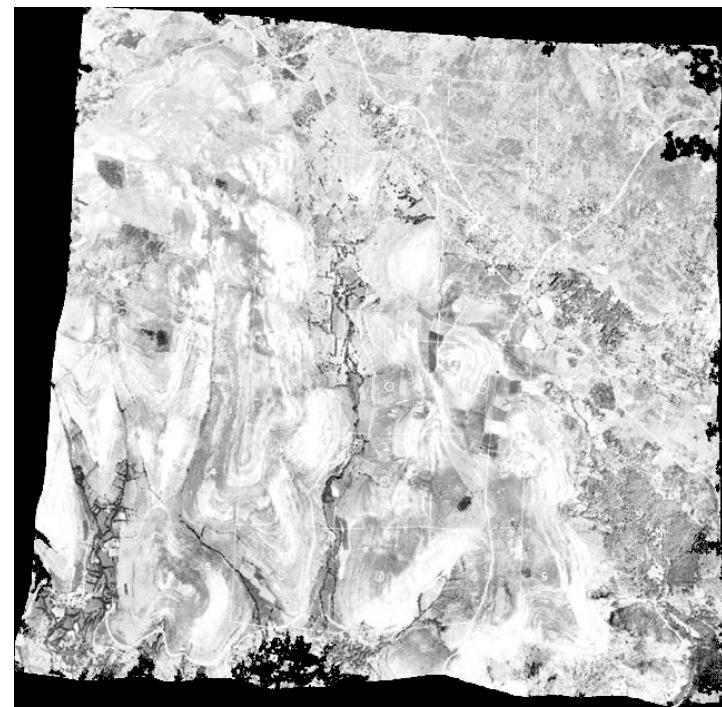
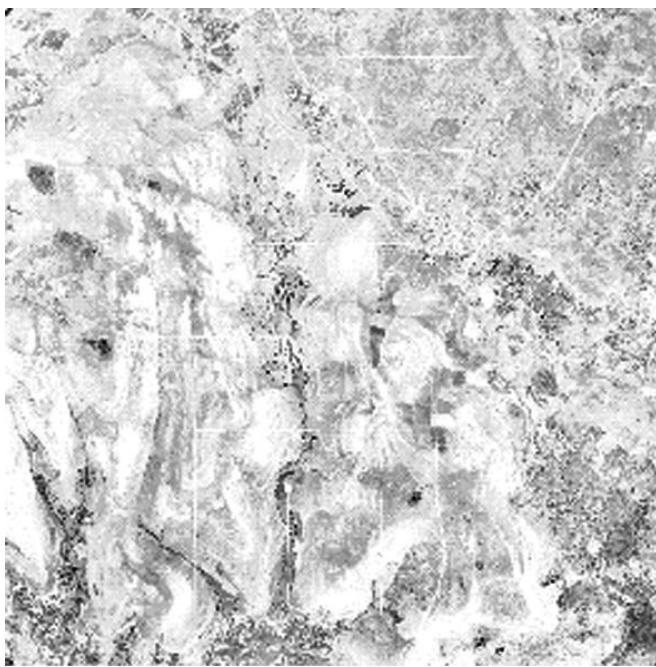


Sur 3 canaux



- Prétraitement : **calibration optique**
- En général, transforme les **comptes numériques (données brutes)** en **valeurs de réflectance (avec une unité de mesure)**
 - Utile lorsqu'on est intéressé par des **comparaisons entre acquisitions à des dates différentes** (distorsions dues aux changement dans la géométrie du capteur et aux caractéristiques d'illumination)
 - Conversion en **réflectance TOA (*Top of Atmosphere*)** : sans prise en compte des effets atmosphériques → possible uniquement avec les données **ancillaires** (facile!)
 - Conversion en **réflectance BOA (*Bottom of Atmosphere*)** souvent appelée aussi **TOC (*Top of Canopy*)** : correction des valeurs de réflectance en fonction des conditions atmosphériques (nécessite données météo, en général **plus difficile**)
 - Souvent, la conversion BOA fournit également la détection de la couverture nuageuse (**masque des nuages et ombres**)

- Prétraitement : **orthorectification**
- Un capteur construit une image sur une grille qui **dépend de sa géométrie** (déformations dues à la **perspective** et à la **présence de reliefs**) → le passage à un référentiel géographique (ex. WGS84/UTM) se fait à partir de **données ancillaires (position du capteur)** et **modèles numériques de terrain**

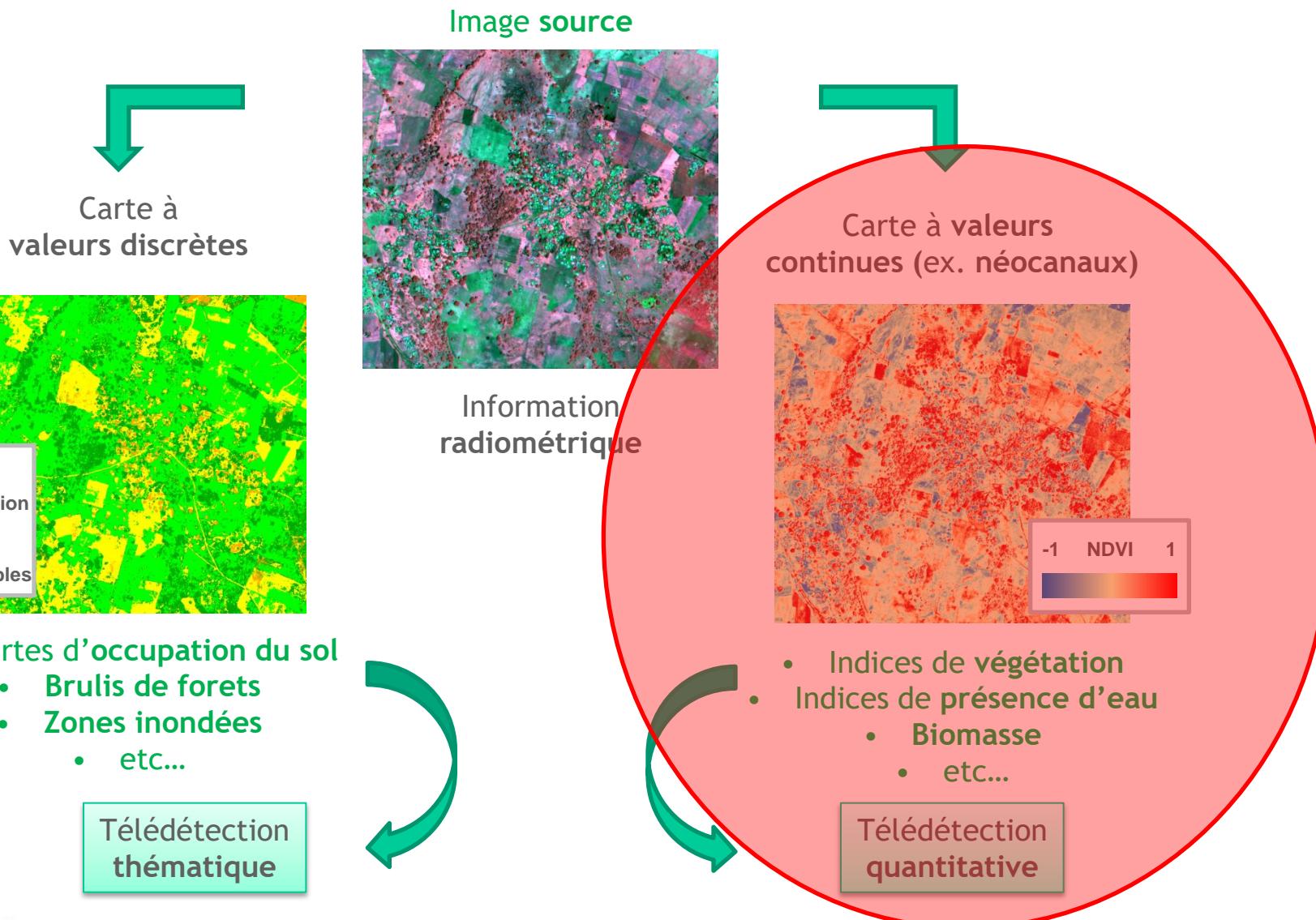


- Prétraitement : **fusion (pansharpening)**
- Traitement spécifique pour capteurs **multi-résolution** (ex. Pléiades)
 - Possibilité d' « injecter » la **précision spatiale** des bandes à plus haute résolution (ex. PAN de Pléiades) dans la source multi-spectrale à résolution plus basse → obtenir une **image multi-spectrale à la meilleure résolution spatiale disponible**

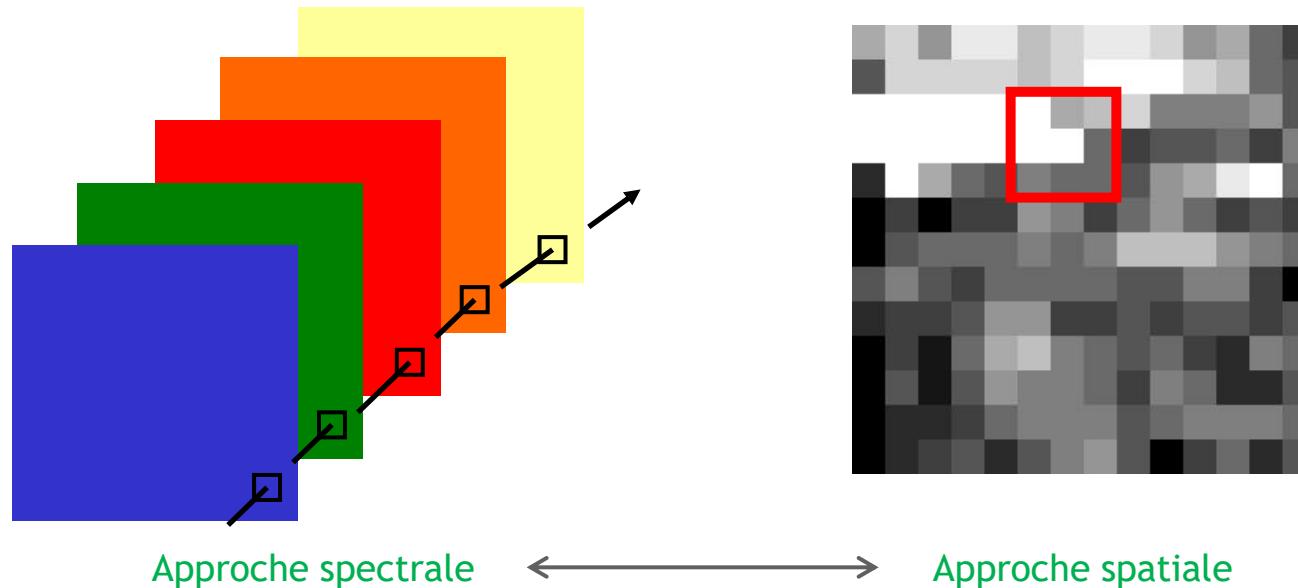


LES INDICES RADIOMÉTRIQUES

Extraction d'information d'images de télédétection



- **Néo-canal : obtenu par calcul à partir des canaux d'origine**
 - n'expriment plus directement une mesure radiométrique
 - ils «concentrent» une partie de l'information utile
- **Permet d'extraire ou de synthétiser l'information utile**
 - Combinaison de bandes spectrales → indices radiométriques
 - Analyse de voisinage → information texturale, contours, etc.



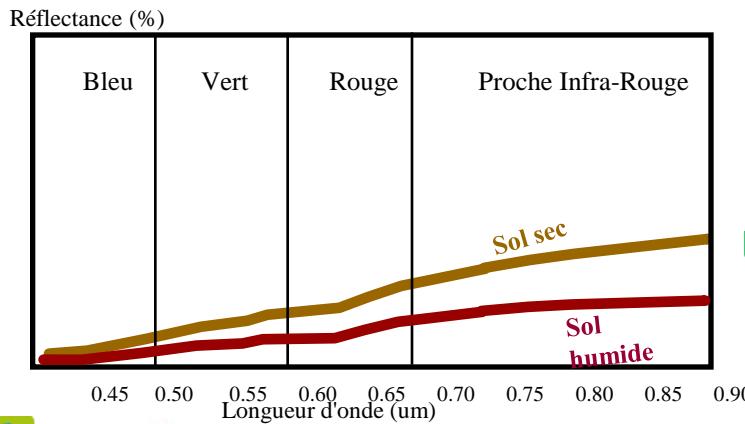
- **Approches physiques** : les indices reposent sur la **différence de comportement des surfaces selon les plages spectrales**
 - L'indice de **brillance**
 - L'indice de **végétation (NDVI)**
 - Autres indices
- **Approches statistiques** : les indices sont issues de **calculs statistiques sur les différentes bandes de l'image**
 - Analyse en **composantes principales**
 - Décorrélation de canaux
 - **Tasseled cap...**

- Utilisé pour différencier les **comportements des sols** :
 - la réflectance varie avec le **type de sol**, **l'humidité**, **la rugosité**, etc.
 - la **fonction de réflectance est linéaire** dans le visible/pir

$$IB = (R^2 + PIR^2)^{1/2}$$

C'est la distance à l'origine
dans un plan R / PIR

- Il en existe d'autres...



lit majeur
terrasses alluviales

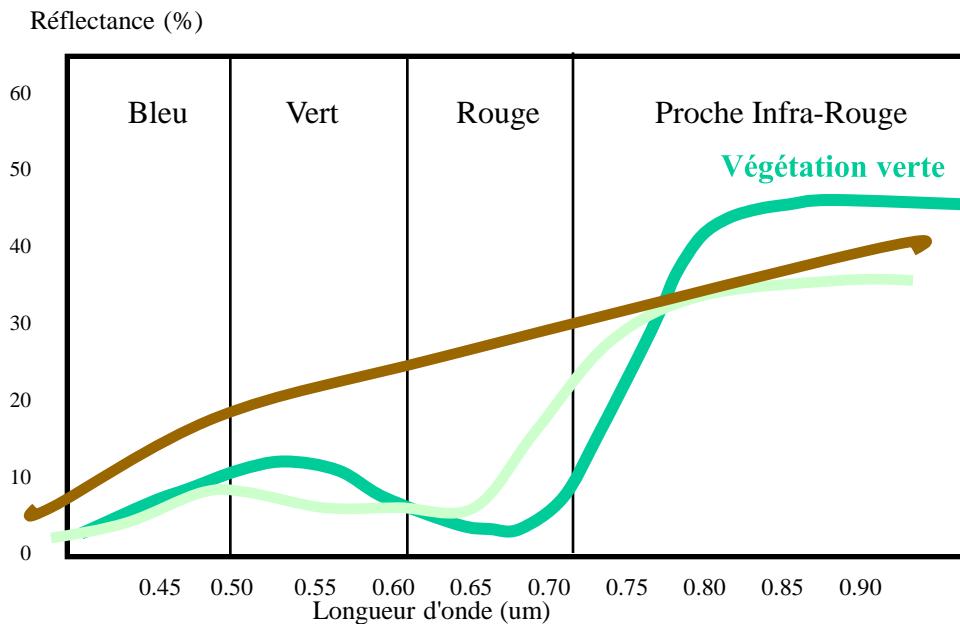


calcul

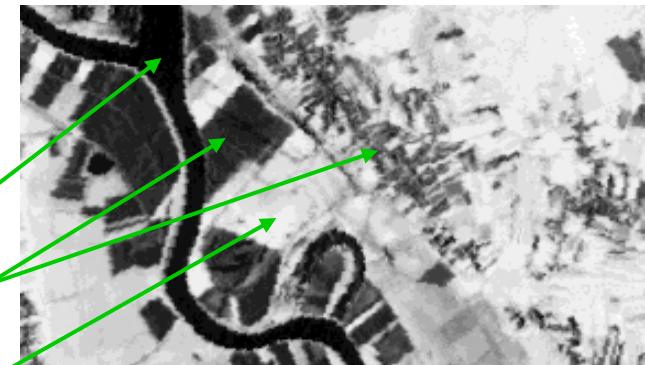


Indice de végétation

- Utilisé pour différencier les **comportements des couverts végétaux**



calcul



Indice restituant l'activité végétative

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R})/(\text{PIR}+\text{R})$$

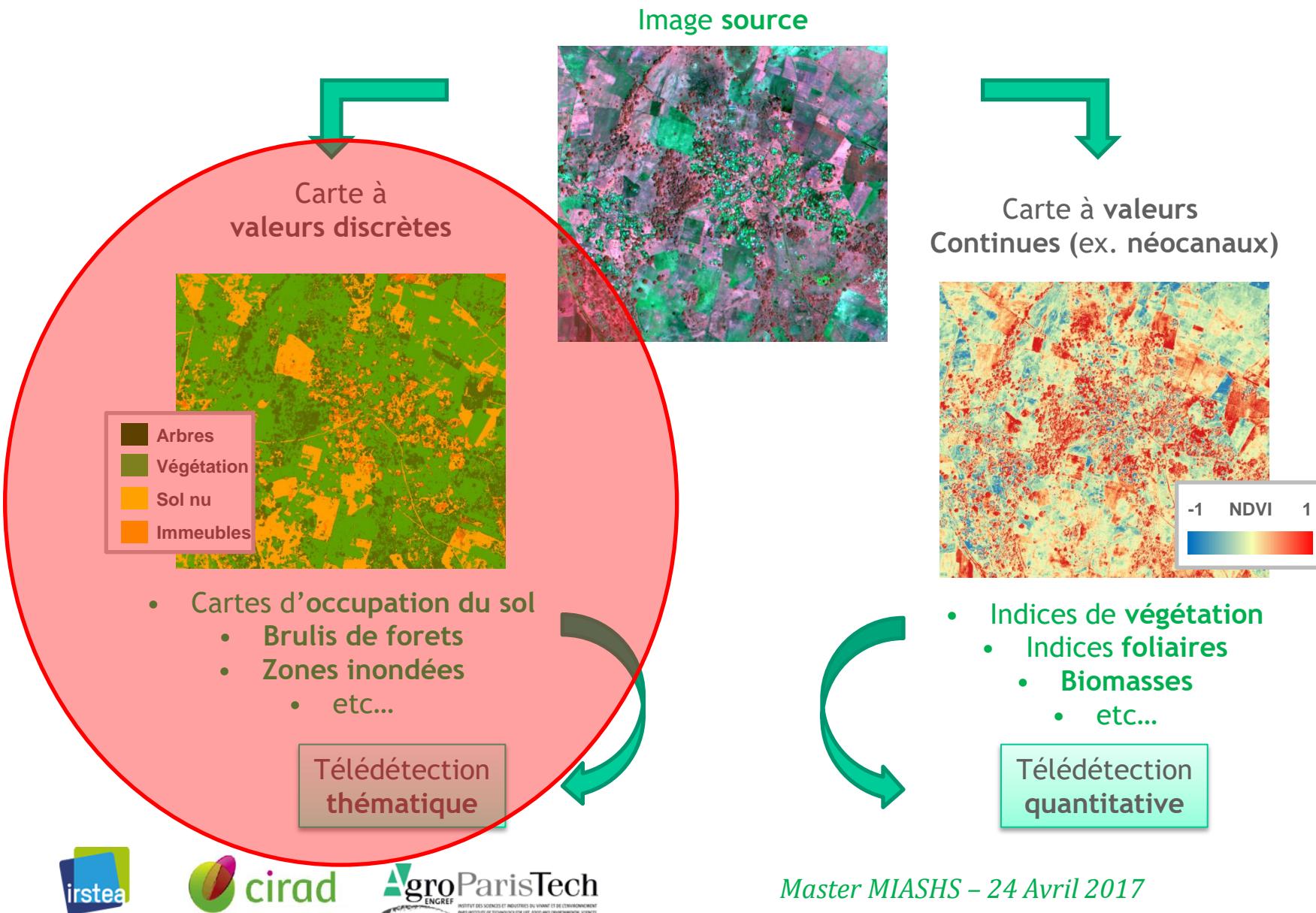
NDVI : Normalised Difference Vegetation Index

$$-1 < \text{NDVI} < 1$$

- Le **calcul d'indices** peut être très varié selon les **thématiques abordées et le besoin de l'utilisateur**
- Indice de teneur en eau → $NDWI = (V - PIR) / (V + PIR)$
- Indice de transparence → $IT = V^2 / R$
 - caractérise la **présence et la densité d'algue** en zone littorale
- Indice de couleur → $IC = (R - V) / (R + V)$
 - caractérise la **couleur des sols**
- ...
- **Autres calculs :**
 - **tout opérateur arithmétique et logique**
 - **calcul de variations multi-temporelles, etc...**

CLASSIFICATION D'IMAGES DE TELEDETECTION

Extraction d'information d'images de télédétection



- La **classification d'image** consiste à affecter une catégorie unique (**classe**) à chacun de ses « individus » (par ex. ses pixels)
- À chaque individus est associé un **descripteur** (*signature spectrale*, « *néocanaux* », descripteurs **texturaux**, **morphologiques**, ...)
- À chaque classe est associé un **élément d'intérêt** (au sens **thématique**) pour les **applications** → *nomenclature*

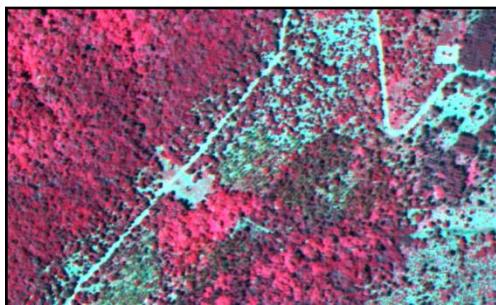


Image multi-spectrale
(millions de signatures spectrales)

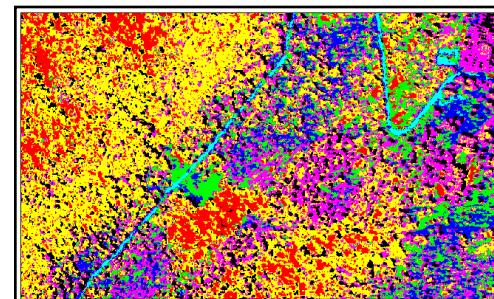
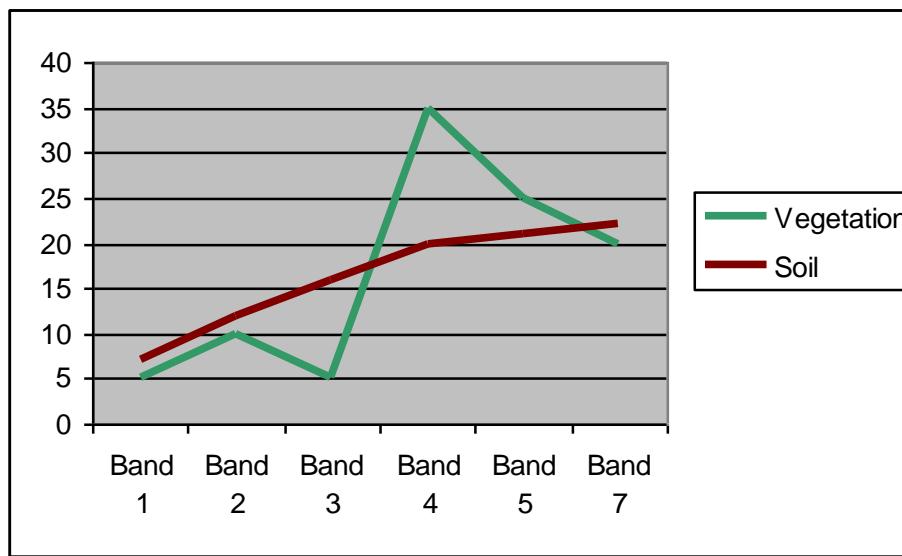
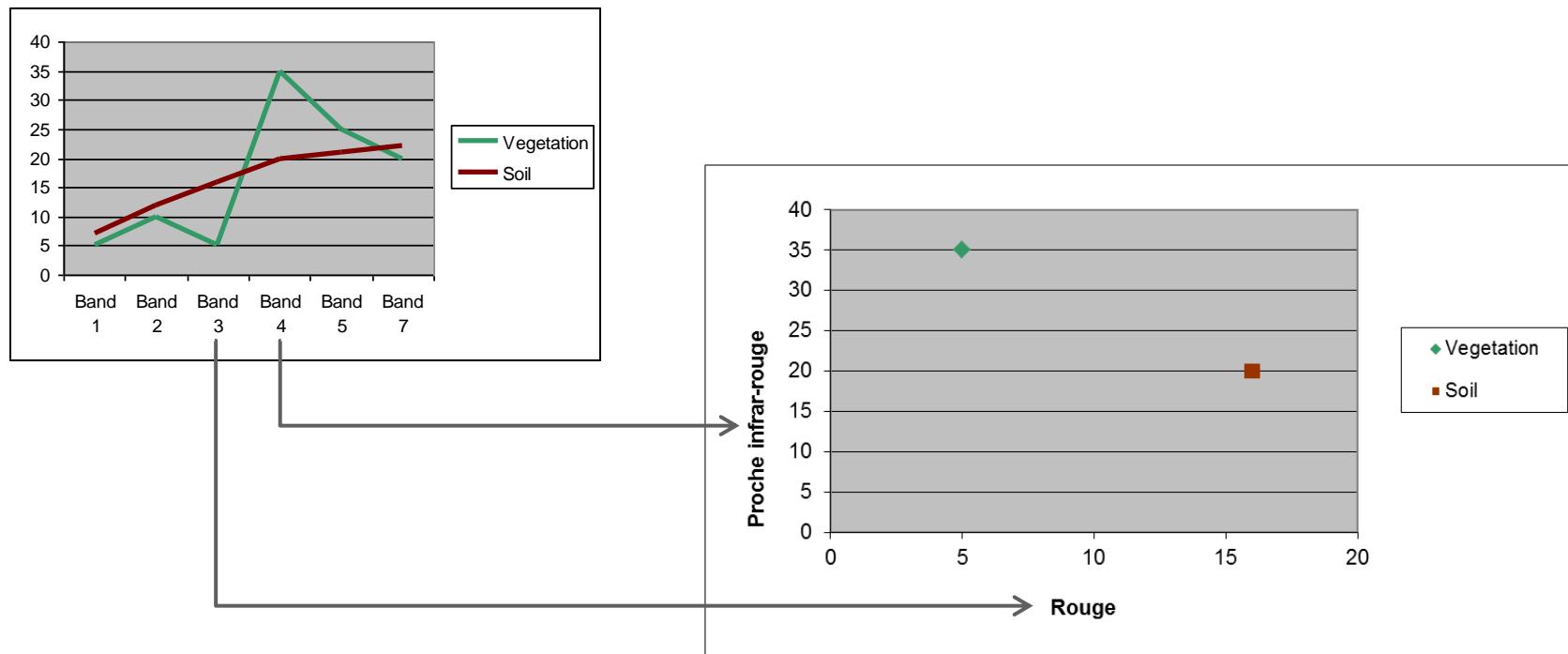


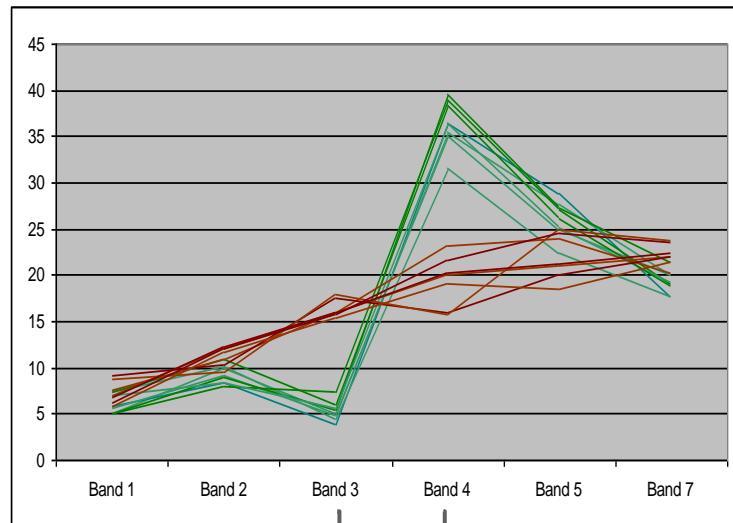
Image classée
(ordre des dizaines de classes)

- Les pixels qui appartiennent à des classes d'*occupation du sol différentes* ont des **signatures spectrales différentes**
- On utilise ces **valeurs radiométriques** mesurées dans les différentes bandes pour **classer les objets**



- Les pixels qui appartiennent à des classes d'*occupation du sol différentes* ont des **signatures spectrales différentes**
- On utilise ces **valeurs radiométriques** mesurées dans les différentes bandes pour **classer les objets**

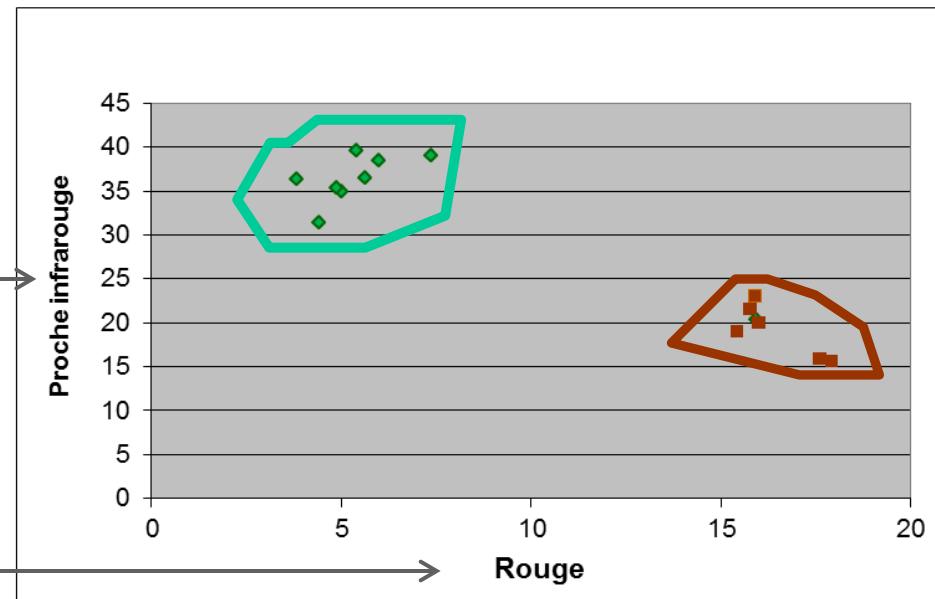




Les pixels occupent une zone différente dans l'espace 2D

Classification

- Tracer les **limites des classes** dans un espace à N dimensions
- Donner un **nom de classe** aux pixels dans ces limites

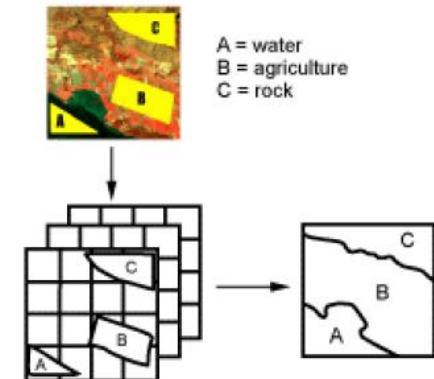


La classification "supervisée" ou "dirigée"

On définit la nomenclature à l'avance

- partition dirigée de l'espace des descripteurs à l'aide de données de terrain → **apprentissage**
- intervention du **thématicien** avant, pendant et après la classification → **interaction**

Supervised classification

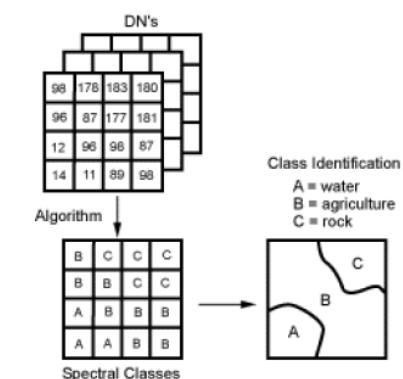


La classification "non supervisée" ou "non dirigée"

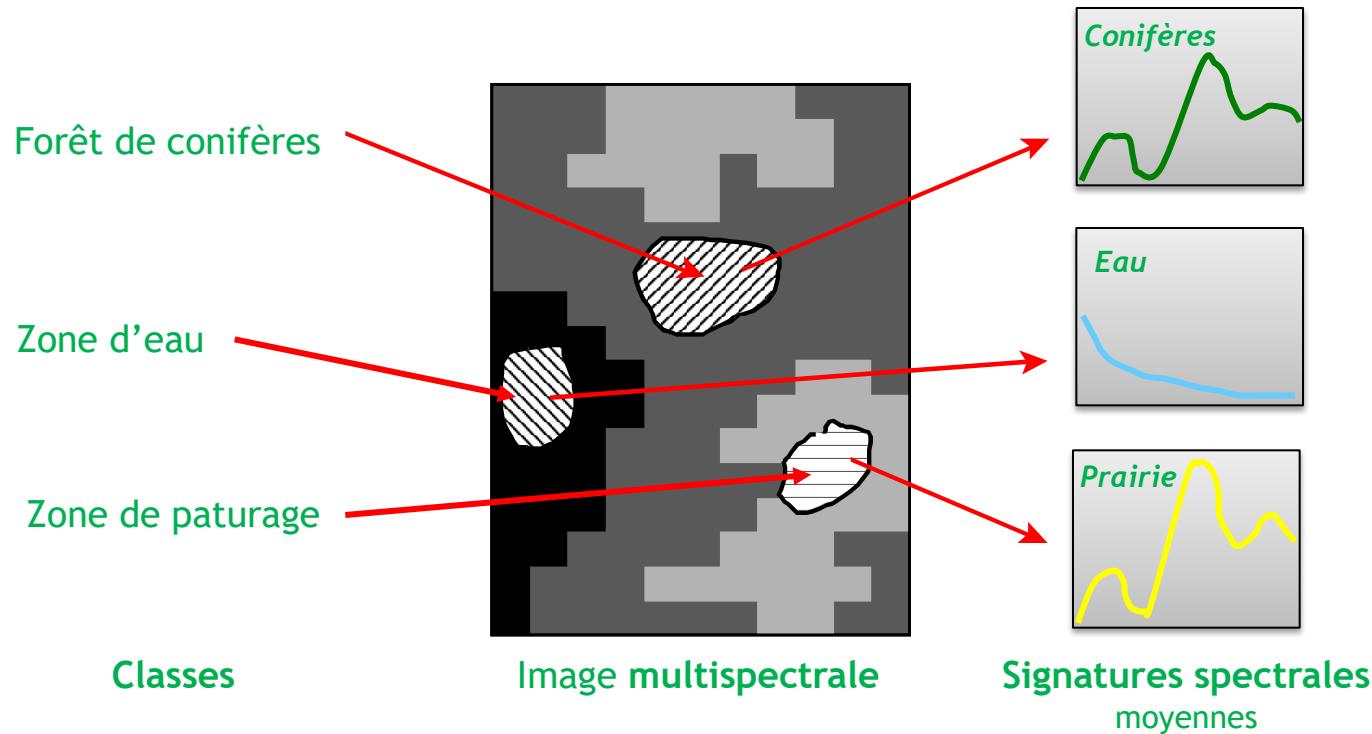
Les données spectrales parlent d'elles-mêmes

- partition automatique de l'espace des descripteurs
 - souvent utilisé en absence de données de vérité terrain
- intervention post-classification pour associer une valeur sémantique à la carte produite

Unsupervised classification

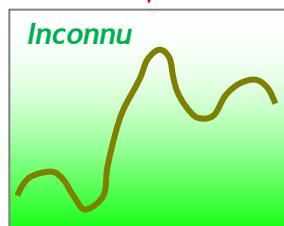
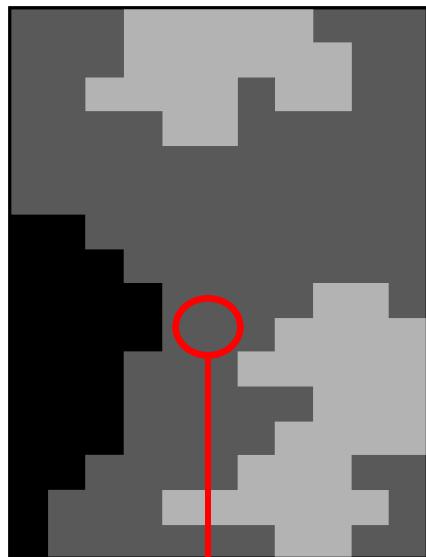


- La classification dirigée nécessite la **sélection et numérisation de zones d'entraînement (*apprentissage*)**.
- Pour faire ce travail, le thématicien utilise la **photo-interprétation**, sa **connaissance** et/ou des **relevés de terrain** (si disponibles)

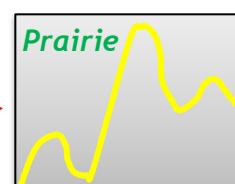


- Les signatures spectrales des **pixels inconnus** sont comparées avec les **signatures de référence** calculées pendant l'apprentissage

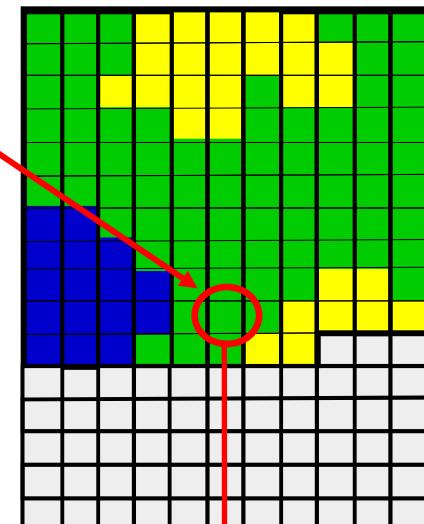
Image multispectrale



Signature du pixel à classer



Information
(Image classée)



Conifères

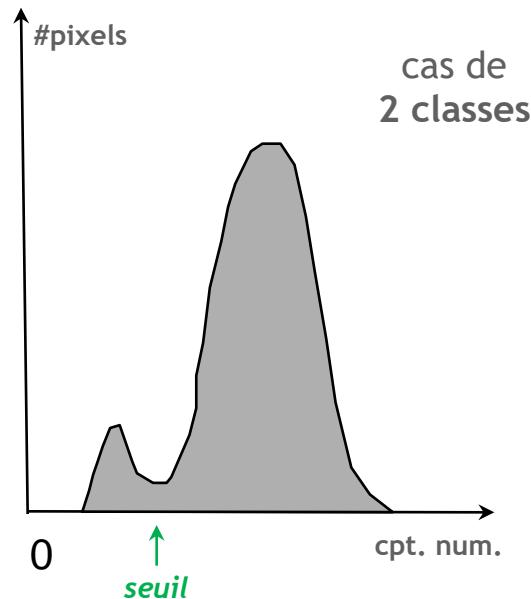
• Seuillage

- Définir des **valeurs de seuil** entre les comptes numériques pour **délimiter les classes d'individus**

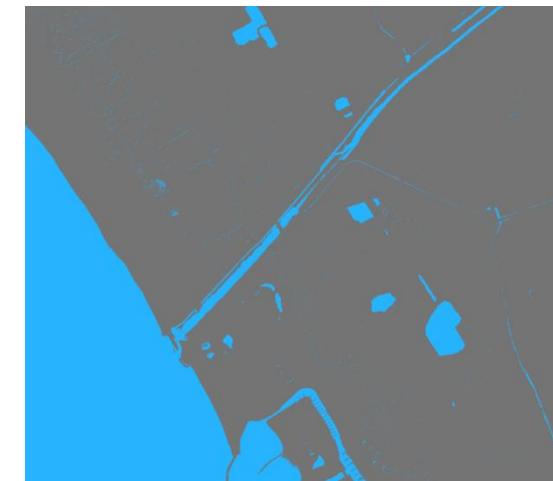
Image panchromatique



Histogramme

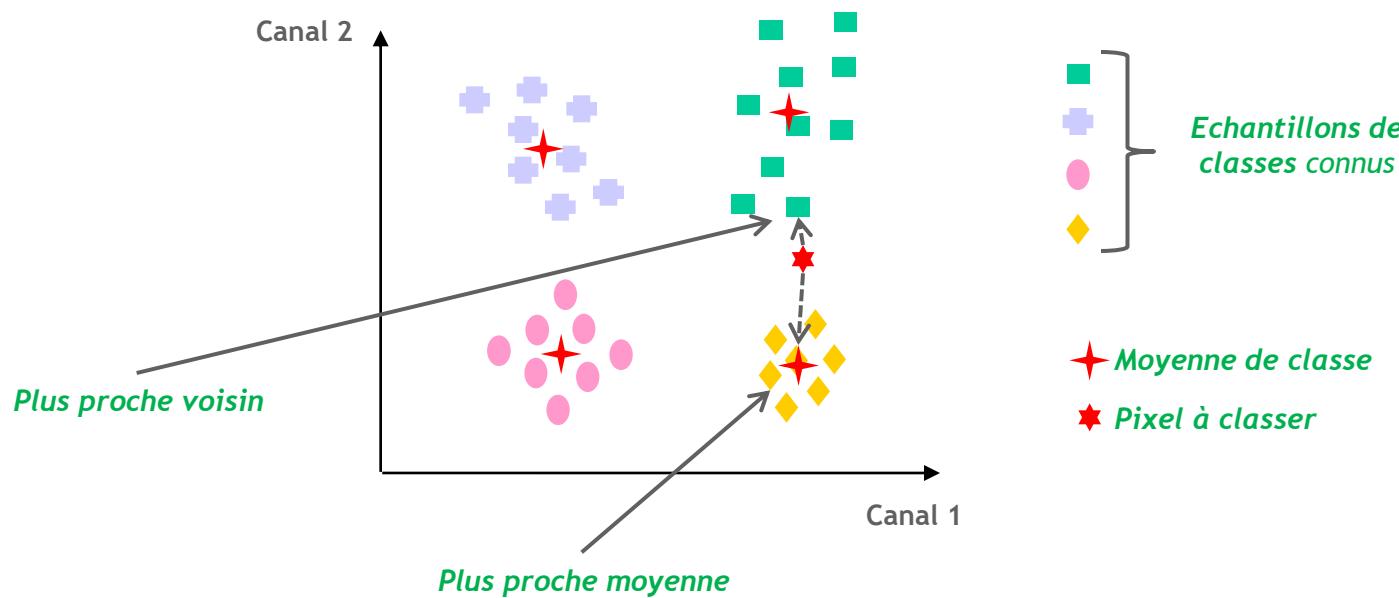


Carte des surfaces en eau

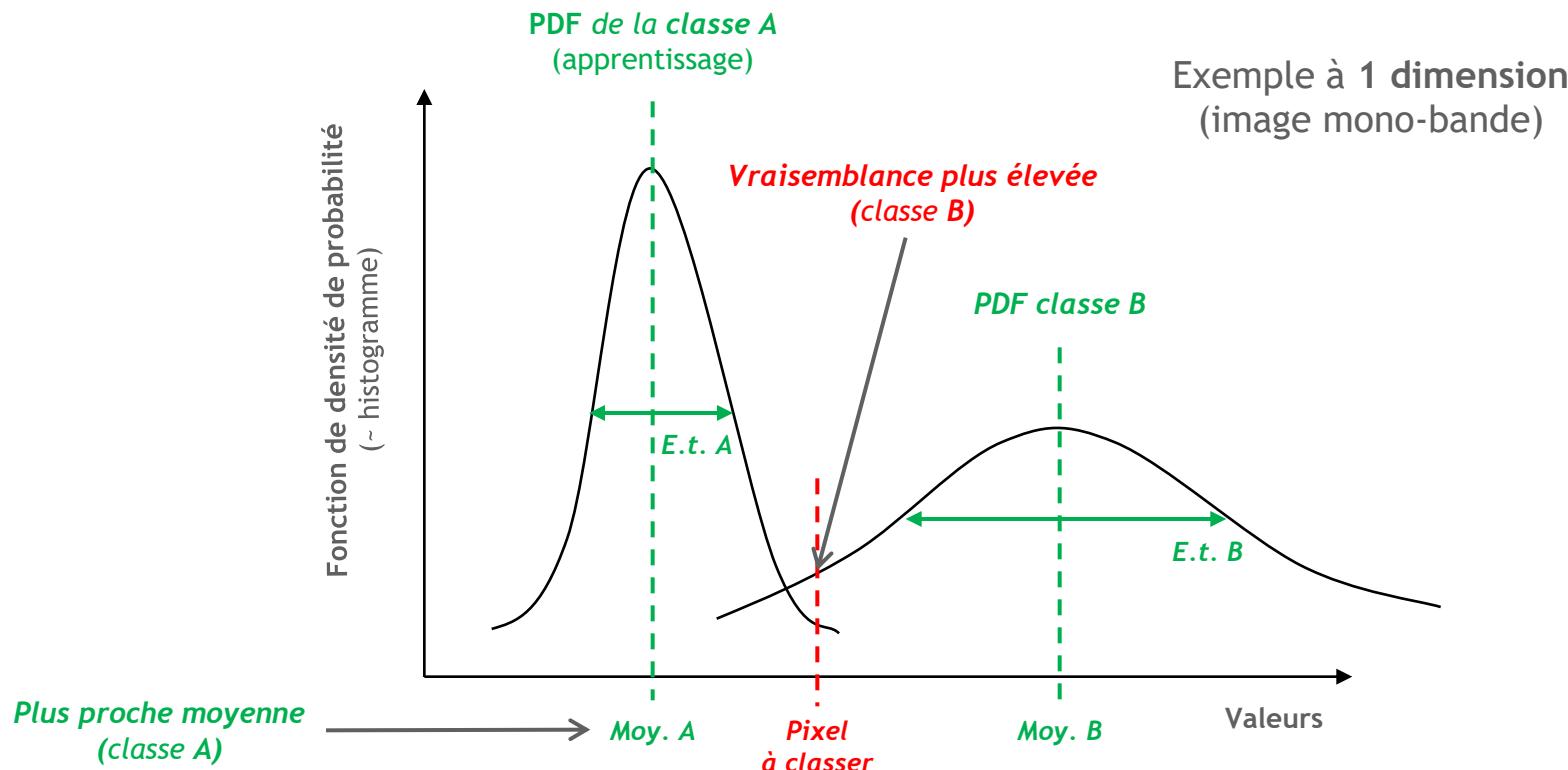


• Distance minimale

- Les pixels à classer sont associés à la **classe plus proche**
- La distance peut être mesurée en prenant par référence la **signature moyenne de chaque classe** (solution typique et rapide) ou **son/ses échantillons les plus proches (PPV)**
- Plusieurs types de distance peuvent être utilisés (euclidienne, ...)



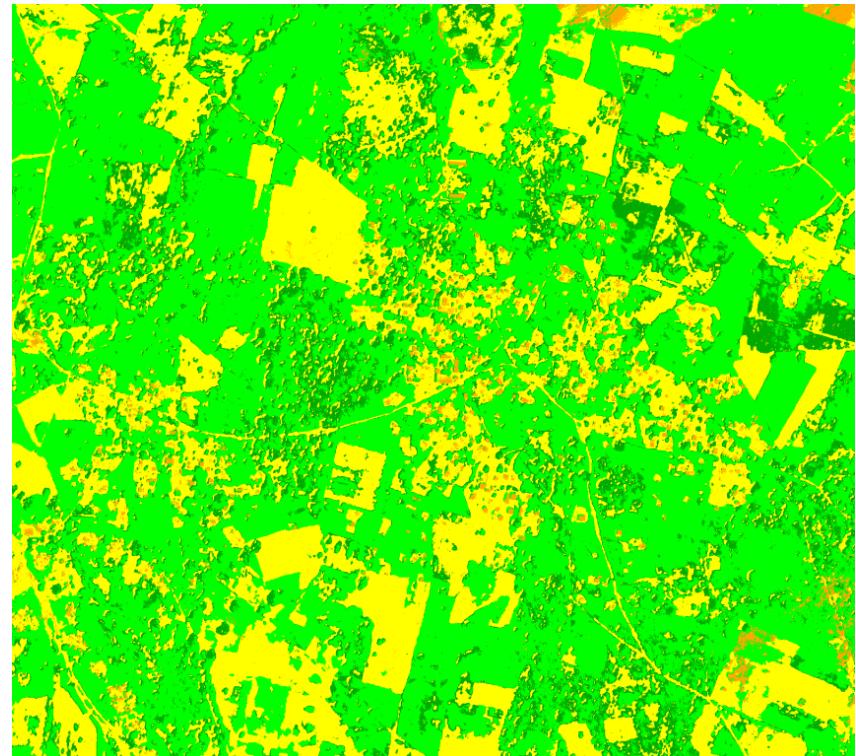
- **Maximum de vraisemblance**
 - Le concept de « classe plus proche » est interprété dans le sens des **distributions (densités) de probabilité**



- Quelques exemples...



Image multispectrale

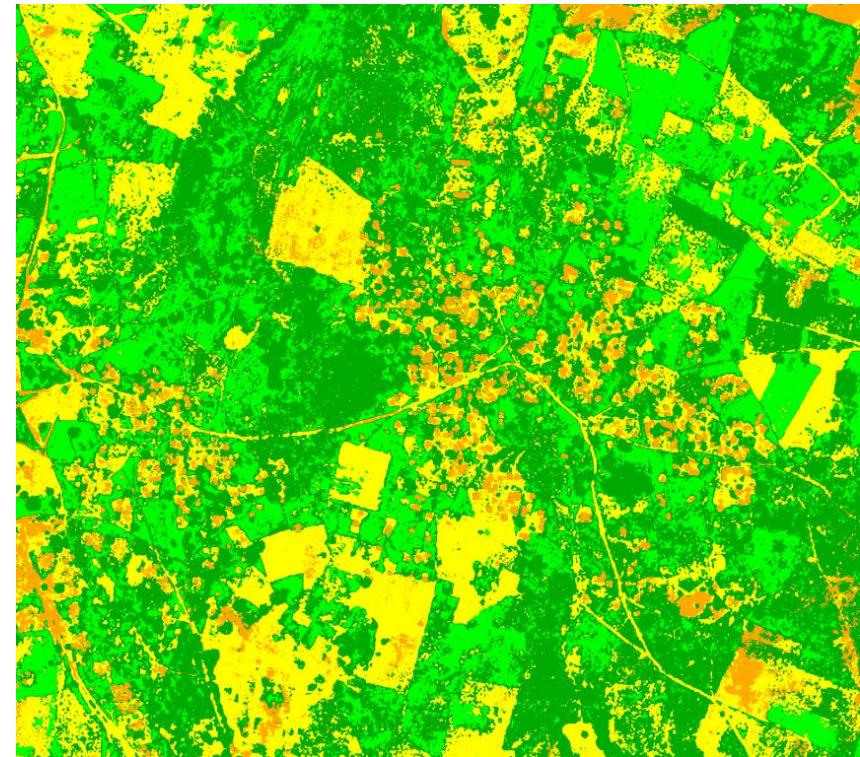


Classification par distance minimale

- Quelques exemples...

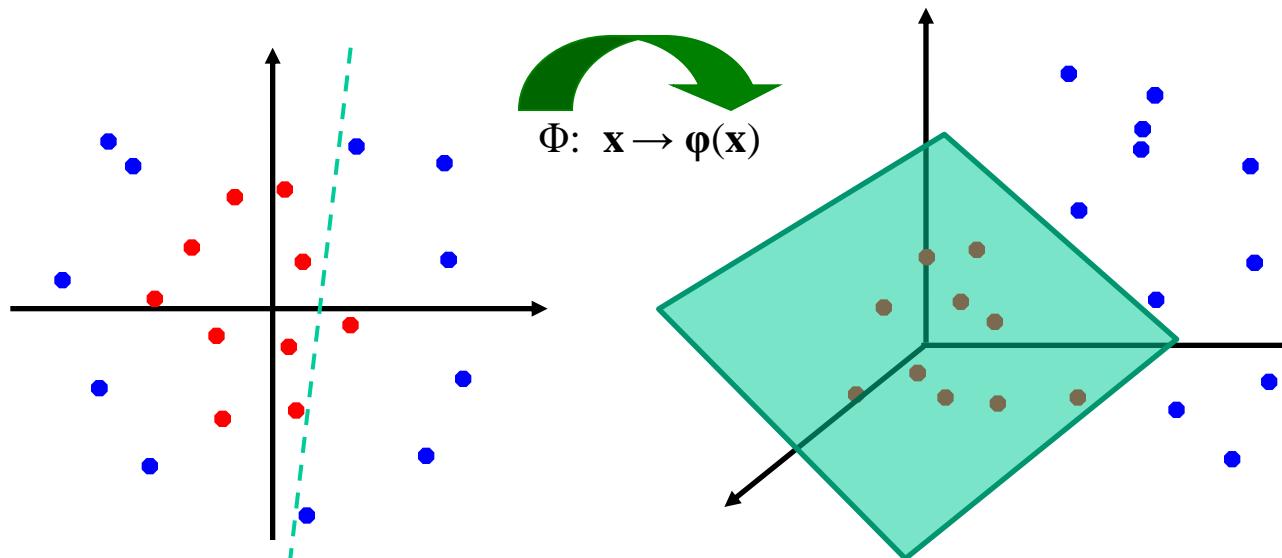


Image multispectrale

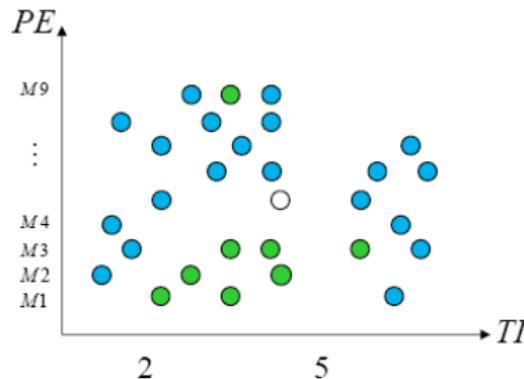


Classification par maximum de vraisemblance

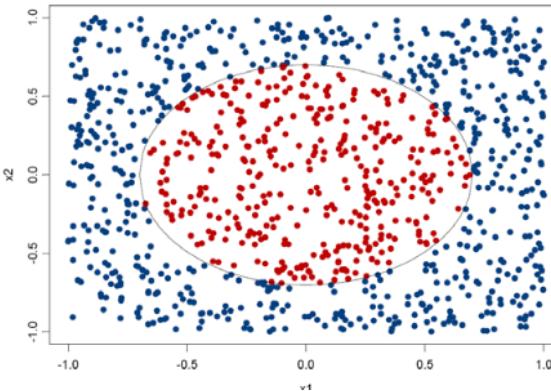
- Dans la pratique, on utilise plus souvent des techniques de **classification supervisée plus complexes**. Quelques exemples...
- **Support Vector Machines (SVM)**
 - Basés sur le principe de **projection des données dans un espace à dimensionnalité plus élevée** (*hyperplans séparateurs*)
 - + Rapide, performante, nécessite peu d'échantillons classés
 - - Le paramétrage est souvent effectué « au hazard »



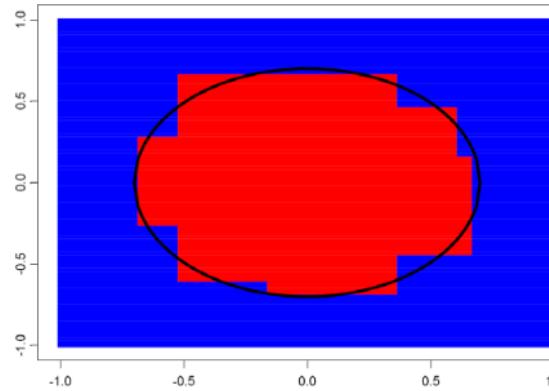
- Dans la pratique, on utilise plus souvent des techniques de **classification supervisée plus complexes**. Quelques exemples...
- **Random Forests (RF)**
 - Basés sur la **combinaison d'arbres de décision multiples** (*bagging*) pour améliorer le *score*
 - + Plus rapide
 - - Moins performante vs. réglages optimales, peu « **interpretable** »



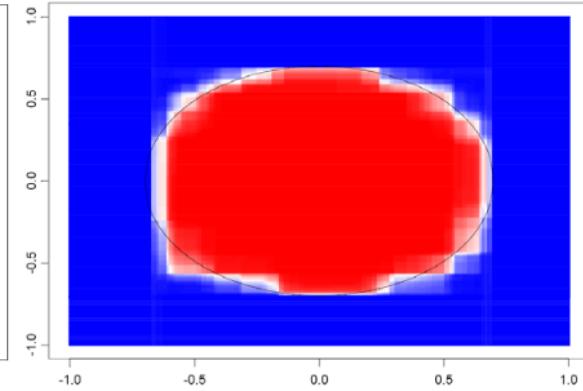
- Dans la pratique, on utilise plus souvent des techniques de **classification supervisée plus complexes**. Quelques exemples...
- **Random Forests (RF)**
 - Basés sur la **combinaison d'arbres de décision multiples** (*bagging*) pour améliorer le *score*
 - + Très rapide (pour images de grande taille), peu de réglages à faire
 - - Moins performante vs. réglages optimales, peu « interpretable »



Echantillons



un seul arbre de décision



100 arbres de décision

- Dans quasiment tous les procédés de classification, **une partie de la vérité terrain est exclue de l'apprentissage et réservée à l'évaluation**
→ « *training set* » et « *test set* »
- Des **mesures d'évaluation** existent pour évaluer une classification...
- **Matrice de confusion**
 - Matrice ayant à la position (i,j) le nombre de **pixels du test set appartenant à la classe i et classé comme j**
 - *Classification « bonne »* → *MdC à diagonale dominante*

$$\kappa = \frac{(N \sum_i a_{ii} - \sum_i a_{i+}a_{+i})}{(N^2 - \sum_i a_{i+}a_{+i})} \quad \text{Kappa parameter}$$

User's accuracies

	Water	Tanks	Perm. Veg.	Dry Crops I	Dry Crops II	Wet Crops	User acc.
Water	8515	0	0	0	0	0	100%
Tanks	107	4704	0	0	0	0	97.78%
Perm. Veg.	0	0	6260	0	0	654	90.54%
Dry Crops I	0	0	1980	8721	918	538	71.74%
Dry Crops II	0	0	101	2	7378	440	93.14%
Wet Crops	0	0	316	585	0	2918	76.41%
Prod. acc.	98.76%	100%	72.31%	93.69%	88.93%	64.13%	$\tau = 87.22\%$

Producer's accuracies

Overall accuracy

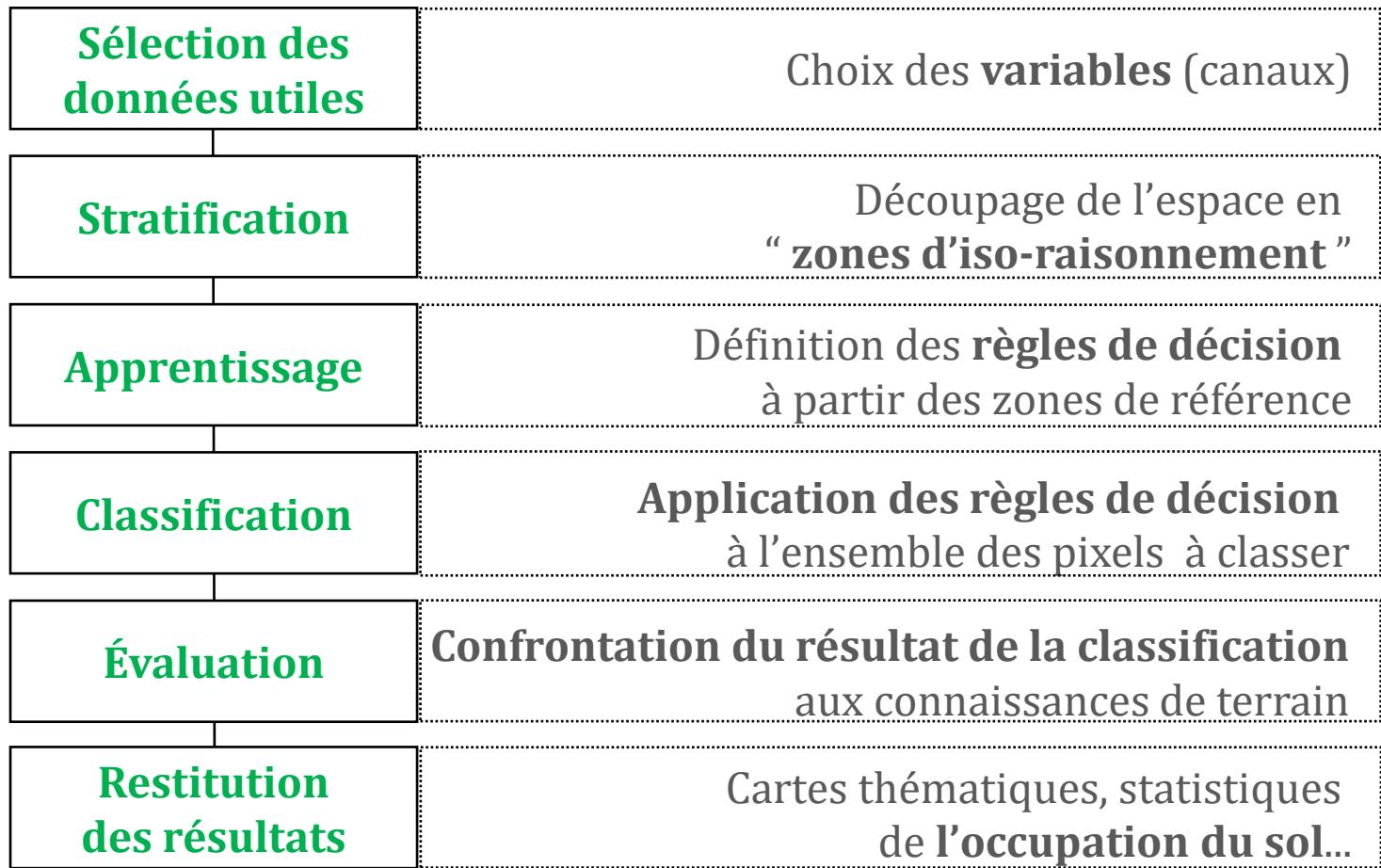
Recommandations pour la validation

- **Objectif « qualité »**: erreur de précision globale minimum = 85%, niveau de précision comparable pour chaque classe >70%
- **Analyse qualitative** de la matrice de confusion en SUS des indices quantitatifs
- **Plusieurs mesures de précision en plus** de la matrice de confusion
- **Standardisation** souhaitable

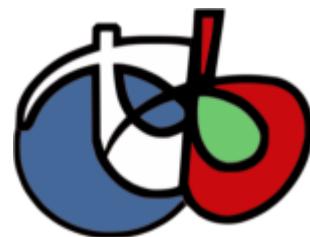
Principales difficultés

- Des **données de référence difficiles à récolter** (échantillonnage et mesures)
- Des **sources d'erreur** multiples
- **Limites des méthodes d'estimation de la précision** existantes
- Problème de la **validation géométrique** (\rightarrow « objet »)

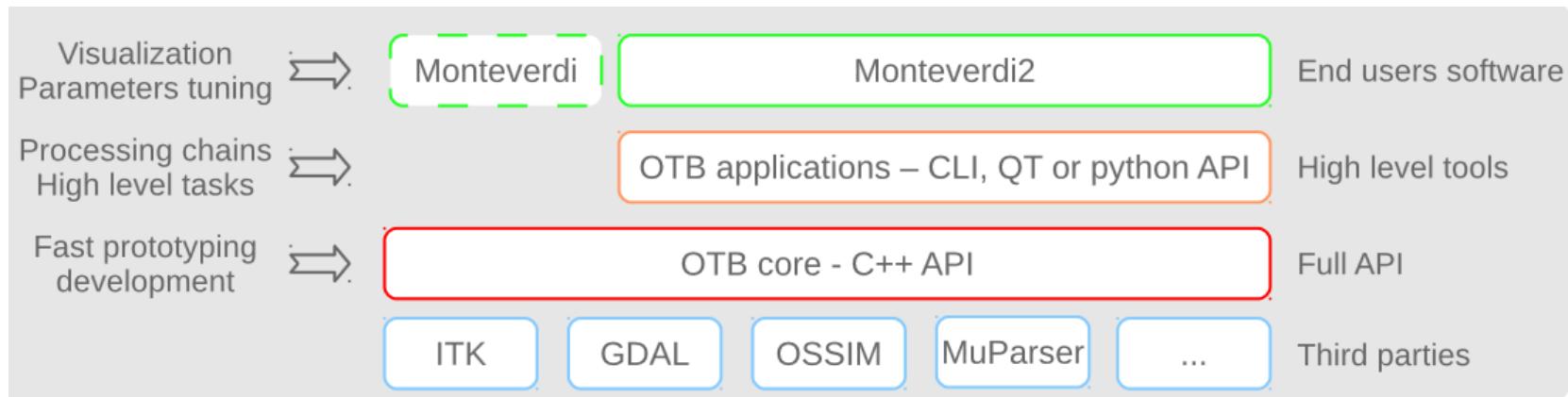
Les différentes étapes



L'ORFEO TOOLBOX



- Développé par le **CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)** en 2006 en appui au programme **Pléiades Orfeo**
- Suite logicielle **libre, open-source** écrit en langage C++
- **Plusieurs objectifs:**
 - Faciliter l'utilisation d'**imagerie THRS** (calculs performants)
 - Capitaliser la **R&D** autour du traitement d'images satellitaires
 - Fournir un ensemble riche d'**outils génériques** aux utilisateurs



- **Ecrire son propre code** en C++ via l'API → nécessite une maîtrise importante en développements informatiques
- **Utiliser les applications** → pour un grand nombre de traitements de base, l'OTB met à disposition des fonctions pouvant être appelé par *ligne de commande* ou des logiciels tiers (ex. **QGIS**)
- **Utiliser Monteverdi2** → l'OTB fournit également un environnement graphique pour l'utilisation des applications permettant également la visualisation et la gestion des données

- **Accès aux données** : lecture des métadonnées, calcul de statistiques
- **Manipulations de base** : corrections radiométriques/géométriques, découpage, extraction et concaténation de bandes, calculs pixel-à-pixel, indices radiométriques, ...
- **Filtrages** : débruitage, filtres morphologiques, ...
- **Extraction d'attributs** : détection de contours, lignes, point d'intérêt, calcul d'indices de textures (Haralick), ...
- **Segmentation d'images**
- **Classification** supervisée et non supervisée
- → **Calcul performants** : *streaming* (permet de traiter des images de taille arbitraire), *multi-threading* (accélère les traitements via une parallélisation des calculs)