



**HAL**  
open science

**Dynamique forestière et changements globaux.  
Exemples d'application de la télédétection spatiale -  
domaine solaire réfléchissant: visible et proche et moyen  
infrarouge (450-2500 nm)**

Dominique Guyon

► **To cite this version:**

Dominique Guyon. Dynamique forestière et changements globaux. Exemples d'application de la télédétection spatiale - domaine solaire réfléchissant: visible et proche et moyen infrarouge (450-2500 nm). Le satellite, un outil au service du Grenelle de l'environnement, Atelier Géothématique, Dec 2010, Bordeaux, France. n.p. hal-02813692

**HAL Id: hal-02813692**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02813692>**

Submitted on 6 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Dynamique forestière et changements globaux

## *Exemples d'application de la télédétection spatiale*

*domaine solaire réfléchissant: visible et proche et moyen infrarouge (450-2500 nm)*



Dominique Guyon ,  
INRA Bordeaux, Unité de Recherche  
EPHYSE

---

*« Le satellite, un outil au service du Grenelle de l'environnement »  
Atelier Géothématique, CETE-SO, 9 décembre 2010*

# ❖ Changements globaux

## ☐ CLIMAT

Réchauffement

Evènements extrêmes

Régime des pluies et sécheresse

## ☐ ACTIVITES HUMAINES

Occupation du sol, aménagement du territoire

Itinéraires techniques, systèmes de production

Objectifs socio-économiques, environnementaux, ....

## **adaptation des écosystèmes?**

→ fonctionnement (carbone, eau)

→ vulnérabilité: dépérissement, incendies, tempête, ...?

→ productivité, durabilité des écosystèmes forestiers?

→ phénologie, indicateur des changements climatiques

→ aires de répartition des essences forestières

→ Itinéraires techniques, systèmes de production?

interactions



# ❖ Suivi de la dynamique forestière

## □ Changements brutaux

/ Réponse directe à un événement

Accidents: incendies, tempêtes, ...

Aménagement/Occupation du sol: déforestation, urbanisation, ...

Sylviculture: coupes

## □ Changements progressifs

/ Réponse aux perturbations des conditions  
environnementales

durables, transitoires, arrières effets, cumulatifs

tendances long terme: allongement cycle végétation, ...

déséquilibres: dépérissements, ....

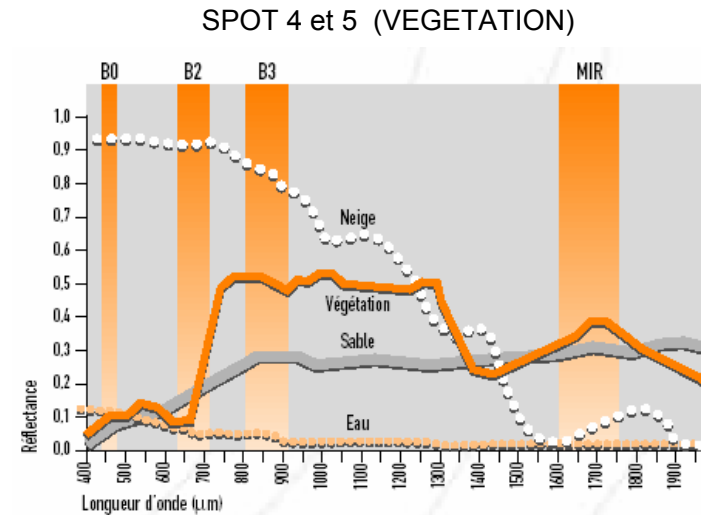
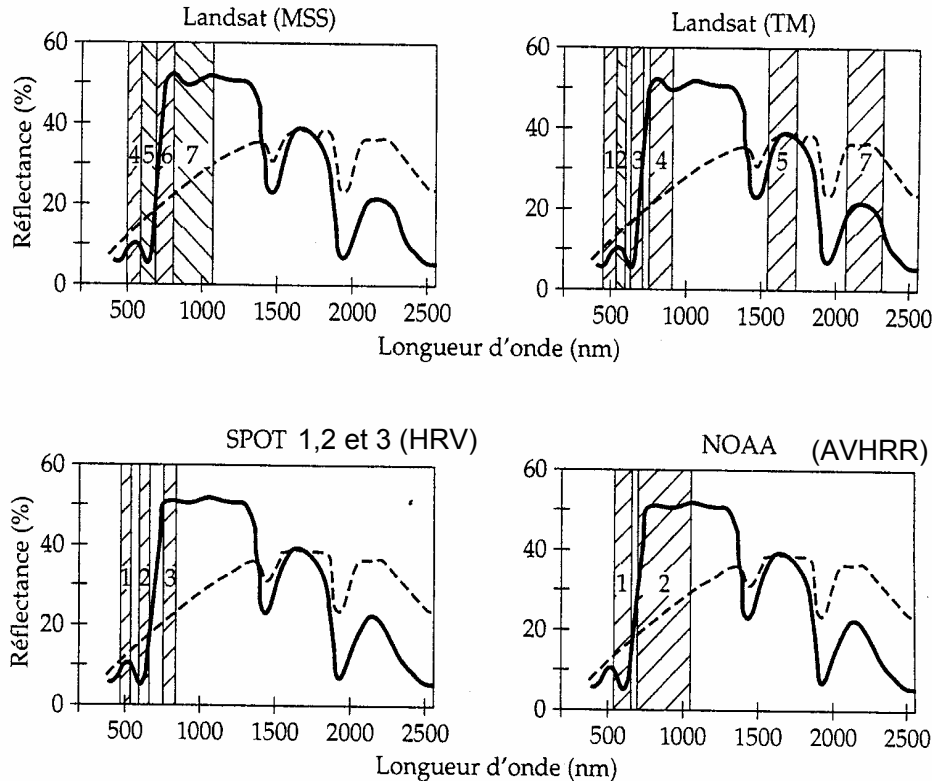
→ détecter, dater, localiser les changements?

→ variations spatiales: locales, régionales, .... ?

→ variations temporelles: saisonnières, interannuelles,  
long terme ?

# ❖ Données de télédétection utiles

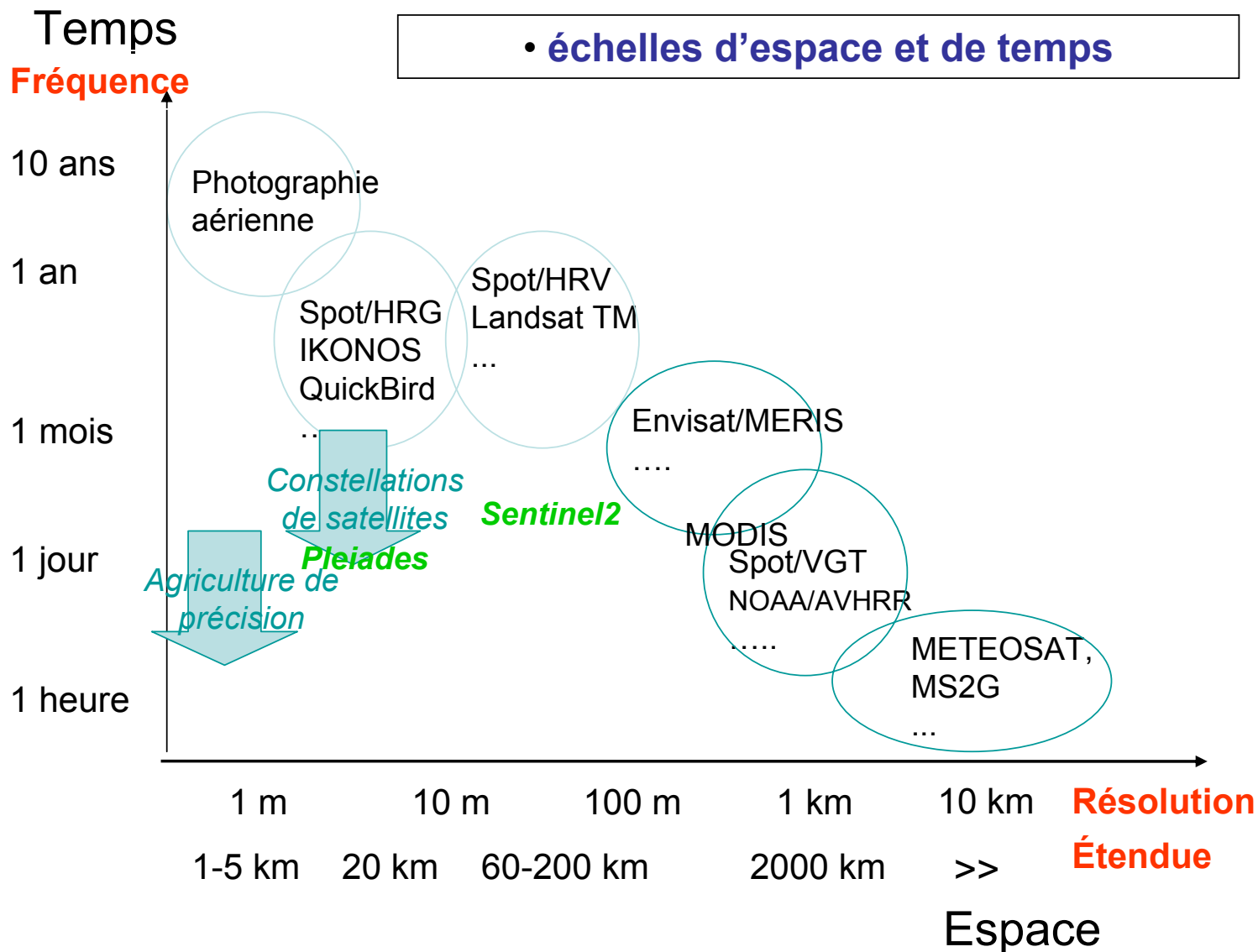
## • Les bandes spectrales



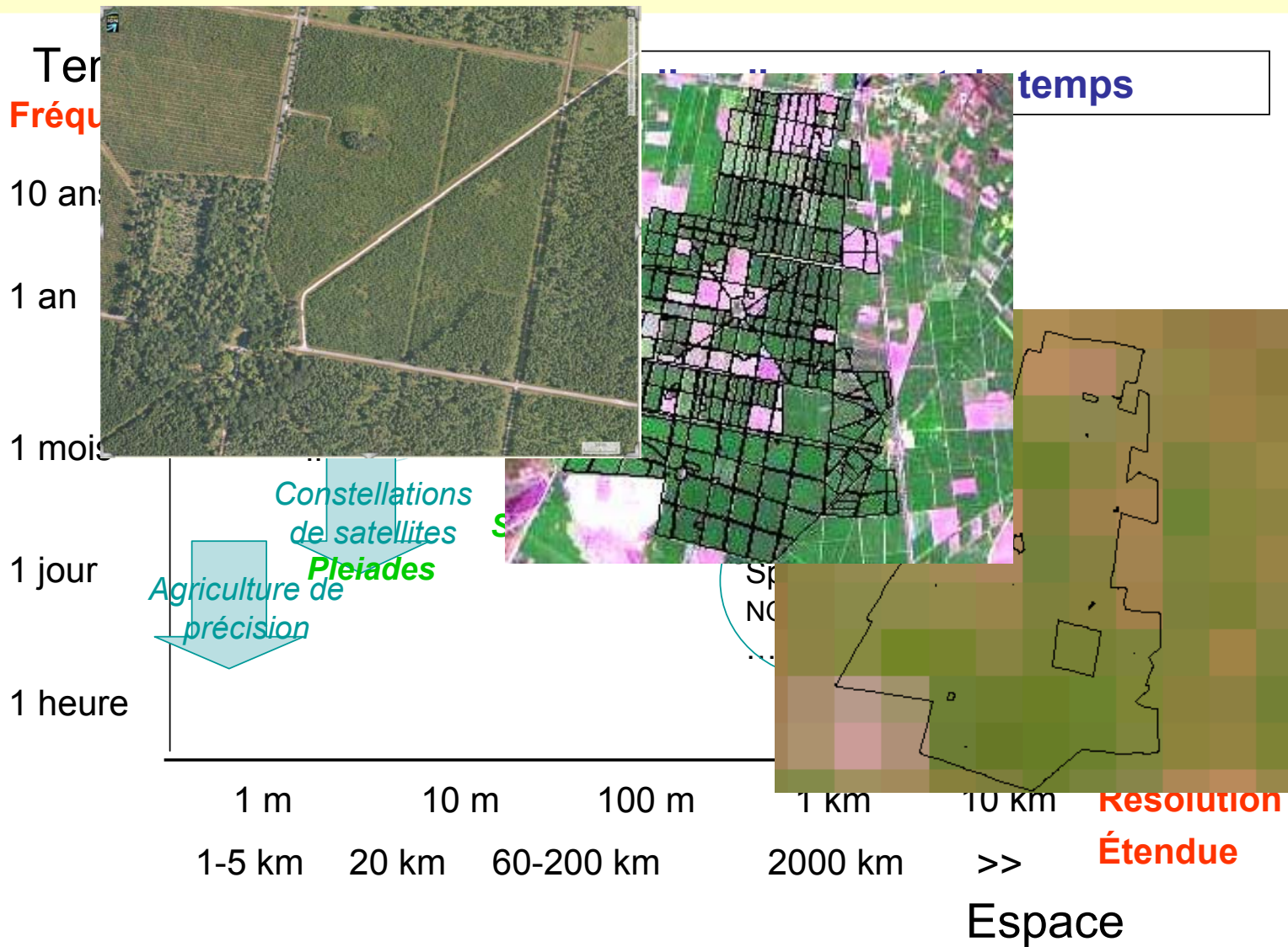
Capteurs multispectraux:

- Toujours au moins une bande spectrale dans le ROUGE et une dans le PROCHE INFRAROUGE
- souvent une dans le MOYEN INFRAROUGE

# ❖ Données de télédétection utiles



# ❖ Données de télédétection utiles



Temps

# ❖ Données de télédétection utiles

Fréquence

Complémentarité des échelles  
d'espace et de temps

10 years

- Visible - Infrarouge (500-2500nm)
- Microondes actives (RADAR)

1 year

- changements à basse fréquence  
échelle  $\leq$  parcelle:

Structure des  
couverts

1 month

1 day

1 hour

Changement d'échelle

- Visible - Infrarouge (500-2500nm)
- Infrarouge thermique
- Microondes passives

- changements à haute fréquence :
- Fonctionnement des  
couverts

1 m

10 m

100 m

1 km

10 km

Résolution

1-5 km

10 km

50-200 km

2000 km

>>

Etendue

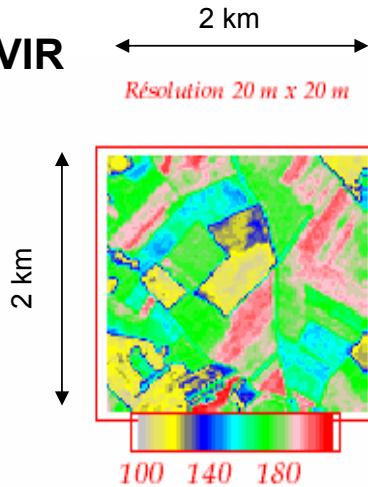
Espace



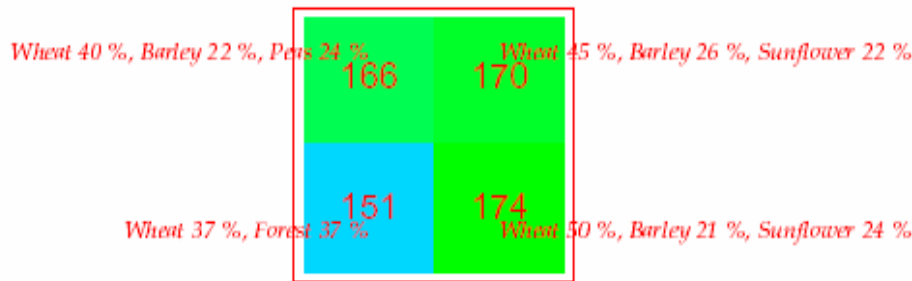
# ❖ Données de télédétection utiles

## • Pixel mixte

### SPOT/HRVIR



### SPOT/VEGETATION



## • Pixel $i$

- $J$  classes,  $\pi_i = (\pi_{i1}, \dots, \pi_{ij}, \dots, \pi_{iJ})$   
 $\pi_{ij}$  = proportion surface de la classe  $j$  dans le pixel  $i$   
 $\sum \pi_{ij} = 1$  dans pixel  $i$

- $\rho_{ij}(t)$ : réflectance de la classe d'occupation du sol  $j$  dans le pixel  $i$

- $X_i(t)$  = réflectance pixel  $i$  à date  $t$

Si pixel  $i \gg$  hauteur des objets (plants, arbres,...):

$$X_i(t) = \sum_{j=1}^J \pi_{ij} \rho_{ij}(t)$$

➤ Méthodes de désagrégation -> estimer  $\rho_{ij}$

# ❖ Exemples d'application de la télédétection

## ☐ Changements brutaux

→ Suivi / prévision production et durabilité

*ex1: Massif landais de pin maritime:*

Dégâts de tempête (1999, 2009)

Cartographie annuelle des coupes rases

**Haute et très haute résolution spatiale**

## ☐ Changements progressifs

→ Suivi de la phénologie / indicateur de la réponse aux conditions pédoclimatiques

*ex2: Forêts feuillues*

Datation stades phénologiques, longueur du cycle de végétation

Variations sous des gradients environnementaux: altitude (*Pyrénées*)

*ex3: Massif landais de pin maritime:*

Hétérogénéités spatio-temporelle de la dynamique saisonnière

**Très fréquente revisite**

*Exemple 1:  
Apport de la haute résolution spatiale pour le suivi de la  
production forestière dans le massif de pin maritime des Landes*

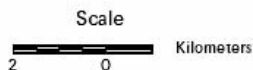
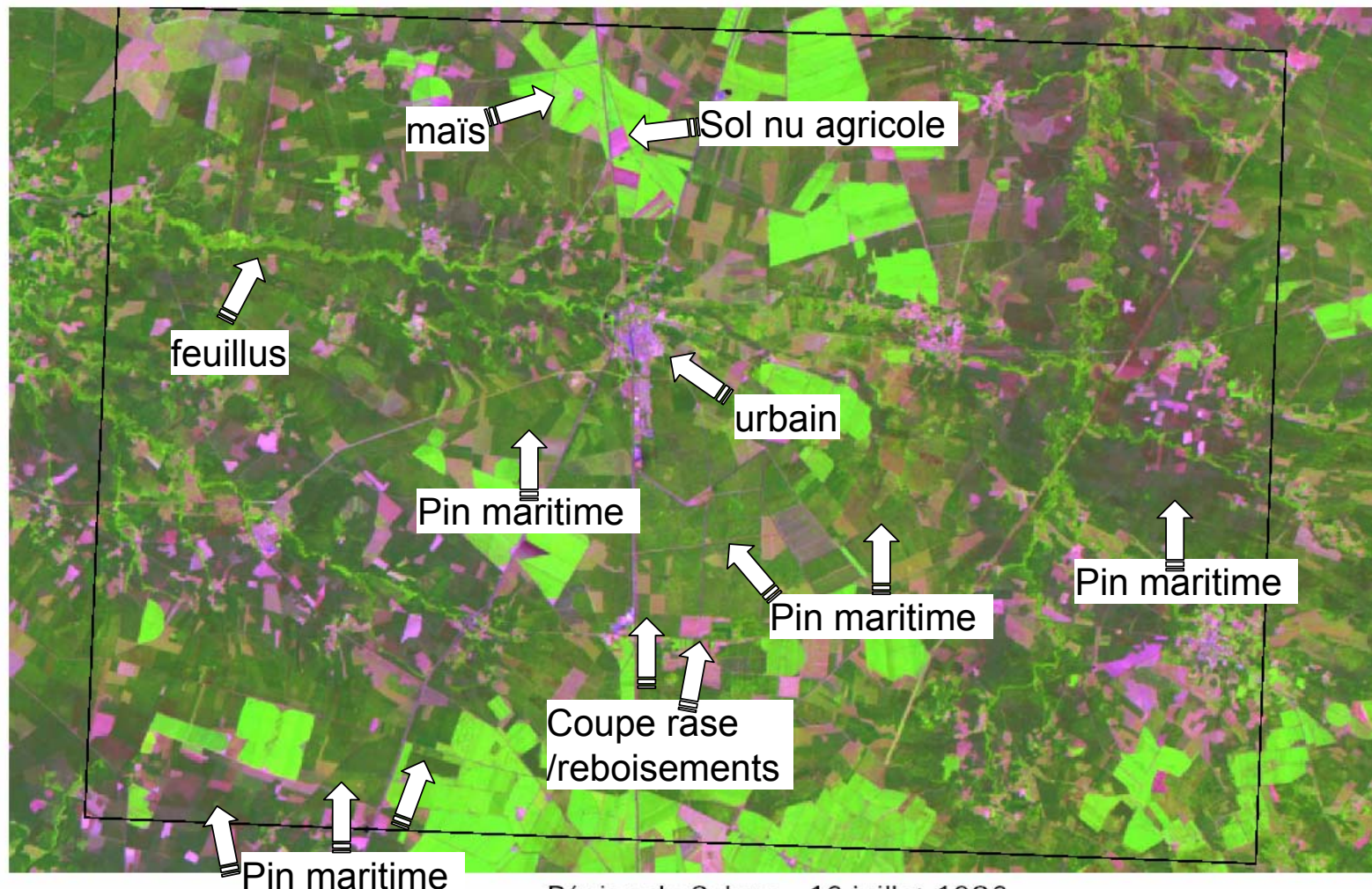


## Exemple d'application 1

Satellites d'observation de la Terre à haute résolution  
HRV ou HRVIR SPOT (1 à 4), Landsat TM

- Haute résolution spatiale: 10 à 30m  
*plusieurs arbres dans un même pixel*  
-> échelle **peuplement**
  - Faible répétitivité temporelle: plusieurs mois  
-> changements **annuels**
  - Longueurs d'onde: Visible, proche et moyen infrarouge
- **Quelles informations sur le couvert forestier et ses changements (discrets: anthropiques ou accidentels) ?**

# Exemple 1

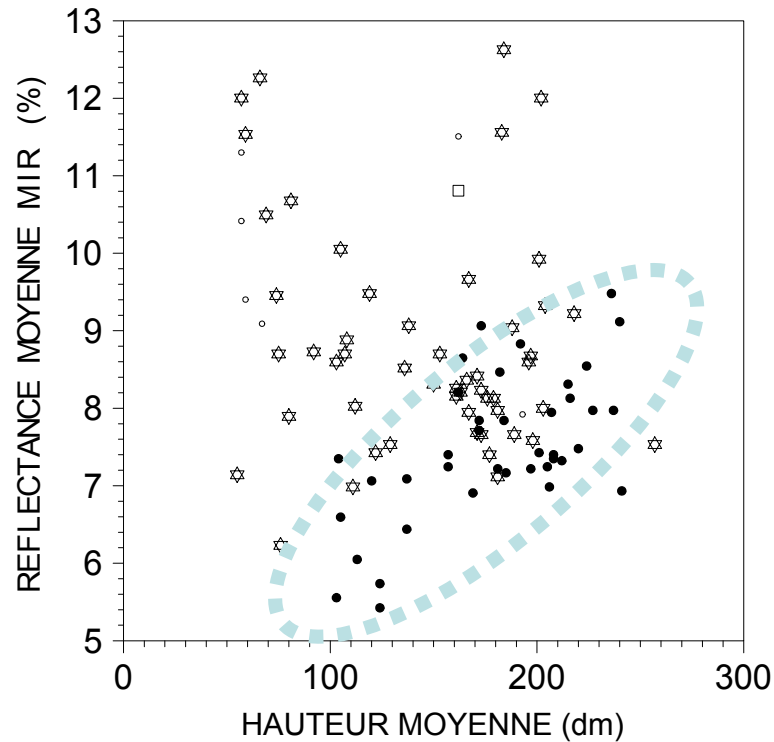


Région de Sabres - 16 juillet 1986  
Landsat TM - rouge=TM5 vert=TM4 bleu=TM3

# Exemple 1

PLACETTES IFN GIRONDE HOMOGENES 5\*5

HAUTEUR MOYENNE / MOYENNE 3x3 TM5



| TAUX DE COUVERT | Symbol | Range (%) |
|-----------------|--------|-----------|
| 20 - 24 %       | □□□    | 20 - 24 % |
| 50 - 74 %       | △△△    | 50 - 74 % |
| 25 - 49 %       | ○○○    | 25 - 49 % |
| >74 %           | ●●●    | >74 %     |



21 avril 1984



13 juillet 1985



16 juillet 1986



20 août 1987



7 septembre 1988



12 octobre 1989



11 juillet 1990

Secteur landais de  
5000 ha

Série d'images  
Landsat TM

sur 7 ans

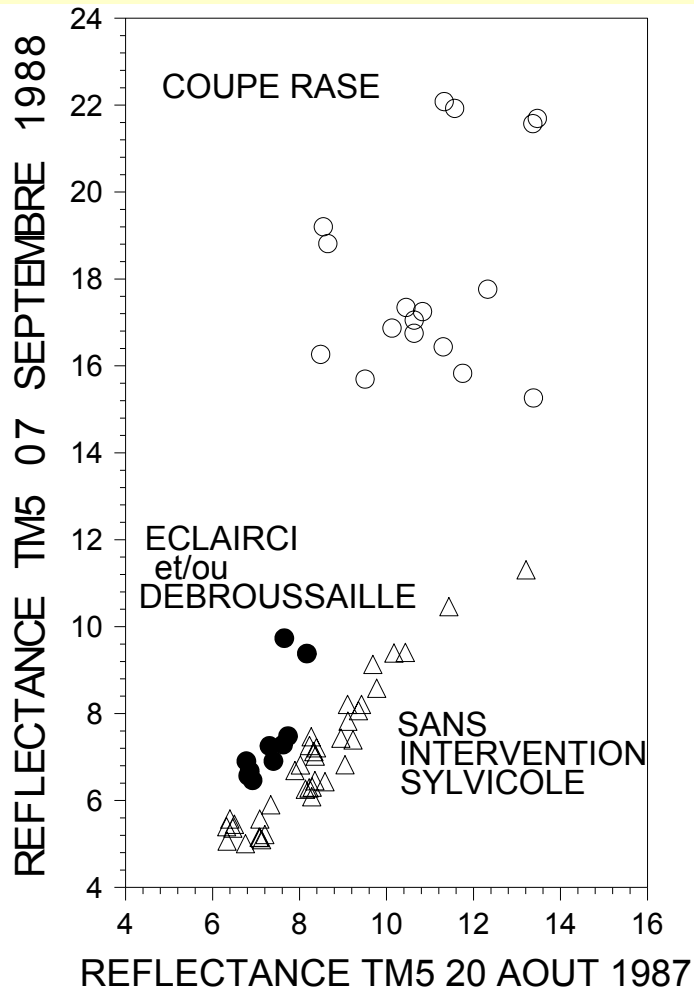
Rouge= TM5

Vert= TM4

Bleu= TM3

- Changements saisonniers : phénologie, calendrier cultural, position soleil
- Changements sylvicoles : **coupe rase**, reboisement, accident (incendie, chablis)
- Changements occupation sol : défrichage

# Exemple 1



Unité = %

|                               | variation moyenne de la réflectance au sol<br>entre les 2 dates<br><i>[nombre de peuplements observés]</i> |              |                                       |
|-------------------------------|--|--------------|---------------------------------------|
| période                       | aucune<br>Intervention<br>sylvicole  | coupe rase   | éclaircie<br>ou/et<br>débroussaillage |
| 21 avril 1984 - 13 juil. 1985 | 0.25<br>[58]   | 9.62<br>[12] | 2.06<br>[7]                           |
| 13 juil. 1985 - 16 juil. 1986 | -0.98<br>[51]  | 7.12<br>[17] | -0.15<br>[5]                          |
| 16 juil. 1986 - 20 août 1987  | -0.49<br>[44]  | 9.33<br>[19] | 1.23<br>[5]                           |
| 20 août 1987 - 07 sept. 1988  | -1.74<br>[38]  | 7.37<br>[17] | -0.08<br>[10]                         |
| 07 sept. 1988 - 12 oct. 1989  | [1.70<br>[46]  | 12.88<br>[9] | 2.58<br>[7]                           |
| 12 oct. 1989 - 11 juil. 1990  | 1.05<br>[40]   | 8.31<br>[3]  | 3.30<br>[7]                           |
| moyenne                       | -0.01<br>[277]   | 8.83<br>[77] | 1.47<br>[41]                          |

Changements de réflectance dans le moyen infrarouge induits par les coupes rases, les éclaircies et les débroussailllements.

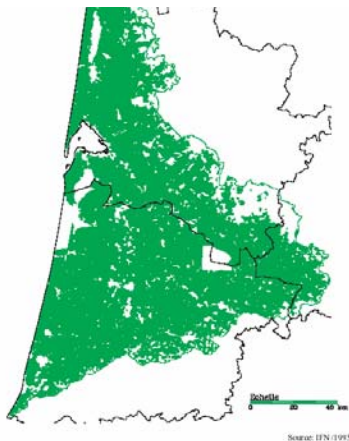
(peuplements de pin maritime de plus de 10 ans)



# Exemple 1: application de la détection des changements radiométriques à la cartographie annuelle des coupes rases dans la futaie de pin maritime

MASSIF DES LANDES DE GASCOGNE

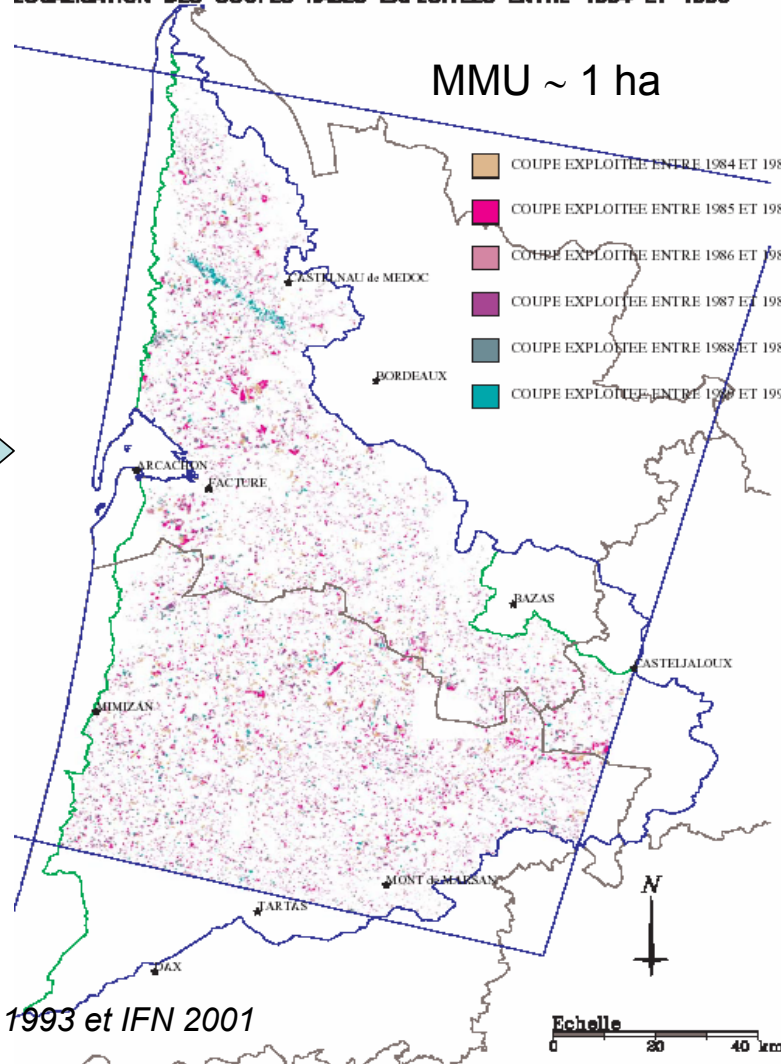
## Carte futaie de pin maritime (IFN)



## LOCALISATION DES COUPES RASES EXPLOITEES ENTRE 1984 ET 1990

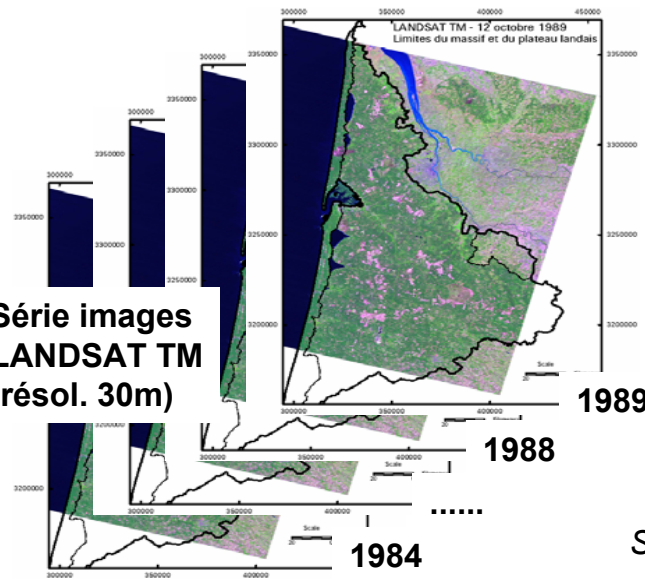
MMU ~ 1 ha

- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1984 ET 1985
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1985 ET 1986
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1986 ET 1987
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1987 ET 1988
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1988 ET 1989
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1989 ET 1990



Source: Jolly 1993 et IFN 2001

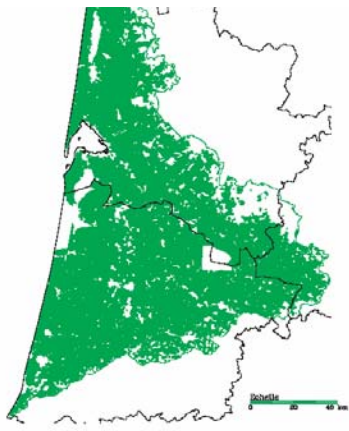
## Série images LANDSAT TM (résol. 30m)



# Exemple 1: application de la détection des changements radiométriques à la cartographie annuelle des coupes rases dans la futaie de pin maritime

MASSIF DES LANDES DE GASCOGNE

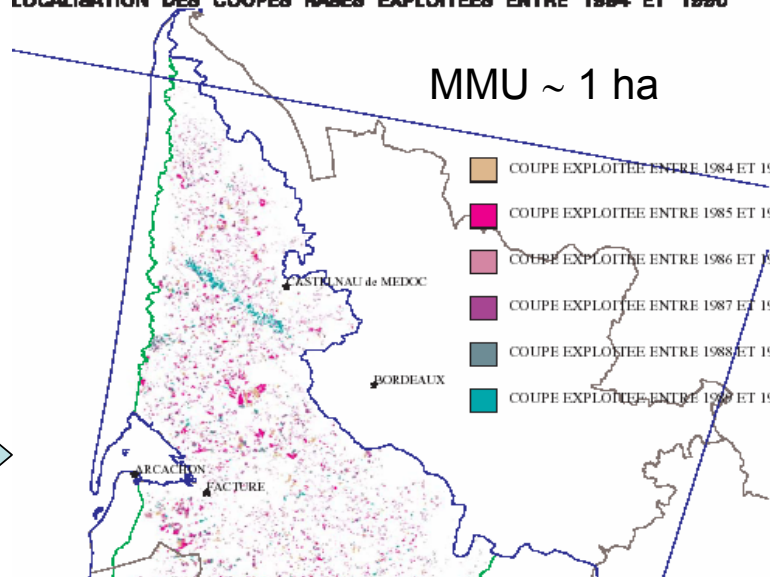
## Carte futaie de pin maritime (IFN)



## LOCALISATION DES COUPES RASES EXPLOITEES ENTRE 1984 ET 1990

MMU ~ 1 ha

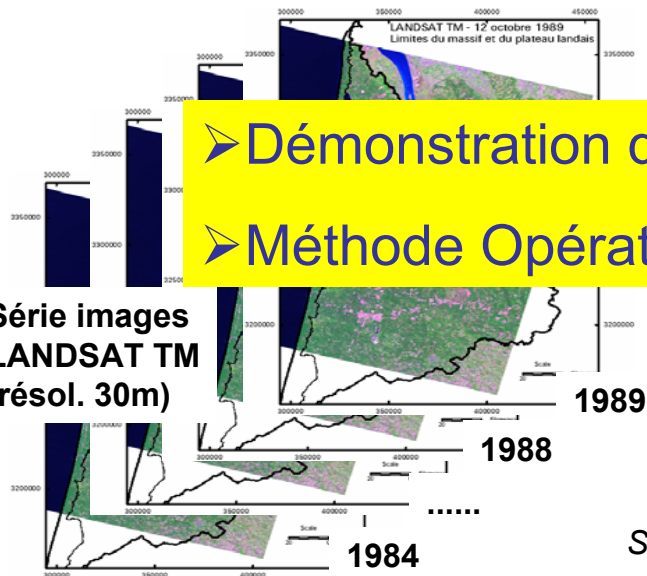
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1984 ET 1985
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1985 ET 1986
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1986 ET 1987
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1987 ET 1988
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1988 ET 1989
- COUPE EXPLOITEE ENTRE 1989 ET 1990



➤ Démonstration de faisabilité: INRA

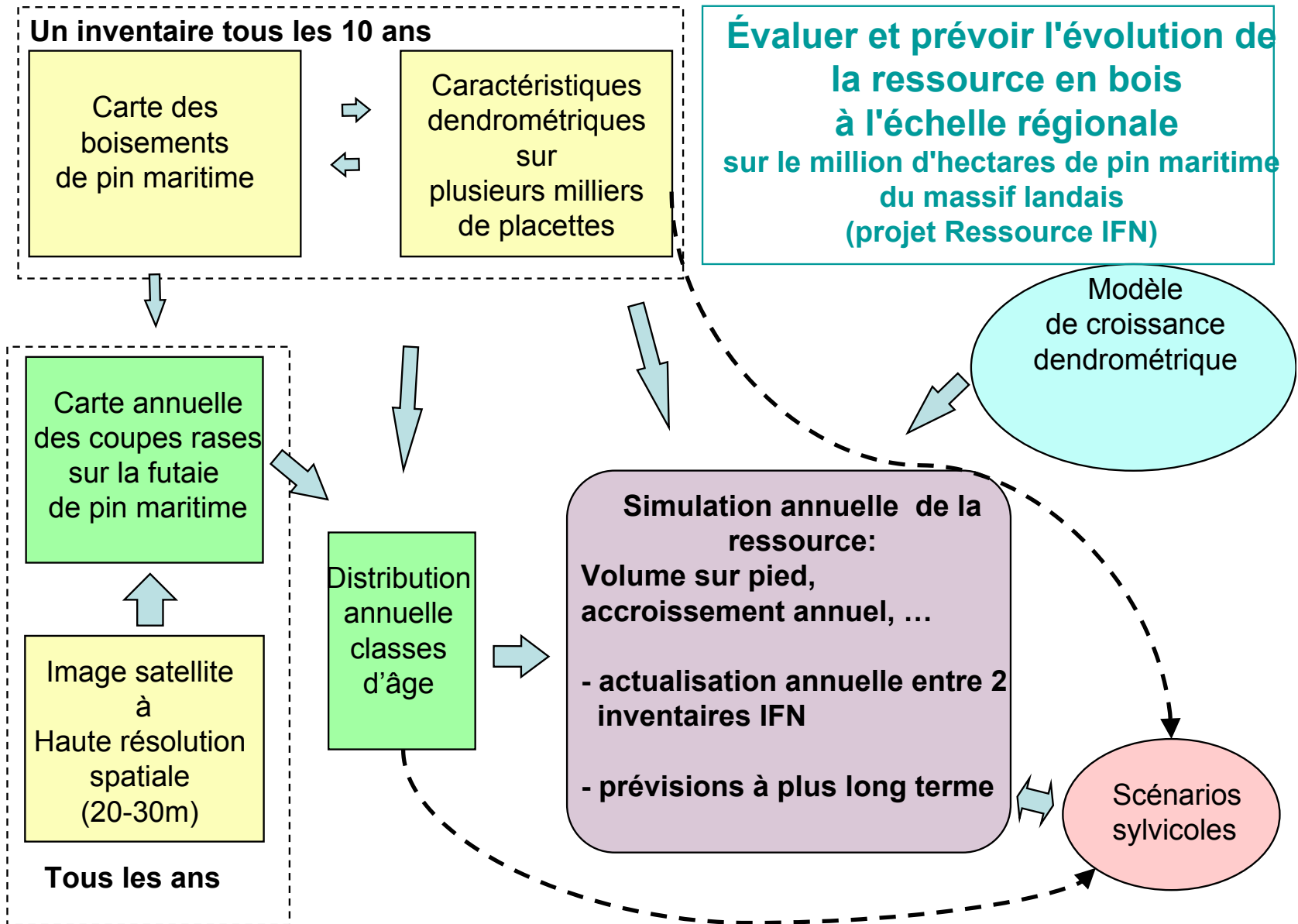
➤ Méthode Opérationnelle, Application: IFN

Série images  
LANDSAT TM  
(résol. 30m)



Source: Jolly 1993 et IFN 2001

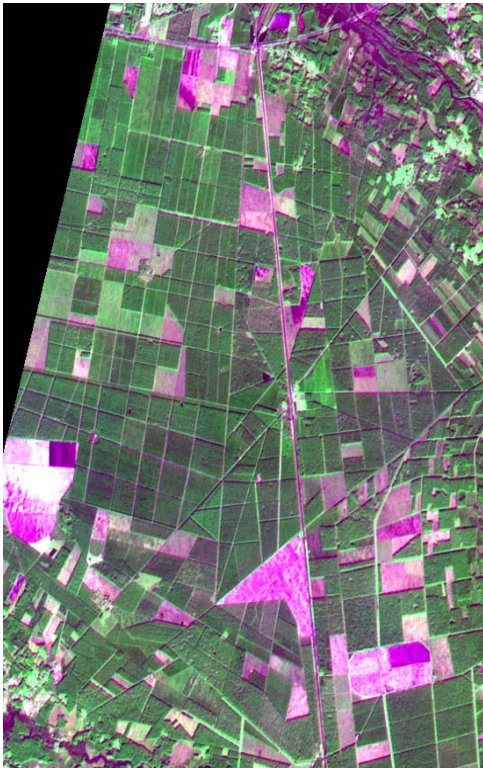
Echelle 0 20 40 km



*Détection et localisation des changements de structure de type coupe rase*  
*Futaie de pin maritime en Aquitaine*

*-> cartographie de dégâts tempête 1999, 2009*

Données SPOT - Résolution 20 m - Rayonnement solaire réfléchi (VIS, PIR, MIR)



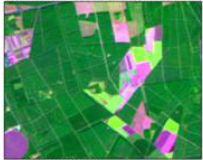
**Avant tempête: 14 février 1999**



**Après tempête: 10 janvier 2000**

# Estimation des dégâts de la tempête de déc. 1999 sur le massif forestier de pin maritime des Landes par l'IFN (Inventaire forestier national)

Extrait d'image avant tempête



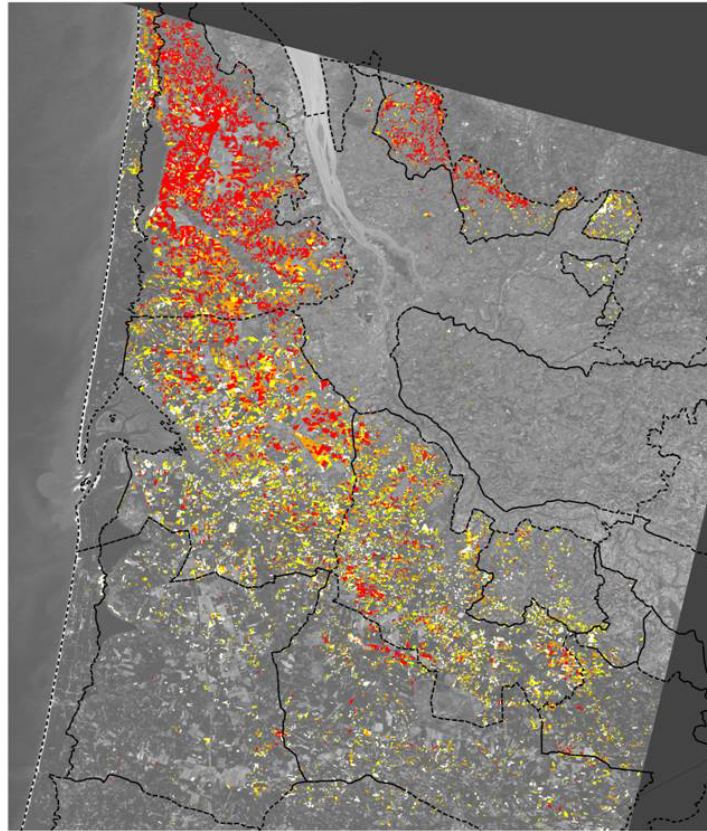
Extrait d'image après tempête



Changements radiométriques



Carte des dégâts



*Futaie de pin maritime en Aquitaine*

## Principe de la méthode et résultats

- précision spatiale:
  - surface minimale représentée (MMU): 4 ha
  - largeur minimale: 50 m
- erreurs d'omission, de commission: 10-15%

## ➤ Méthode Opérationnelle, Application: IFN



-- Limite de région forestière

Intensité des dégâts

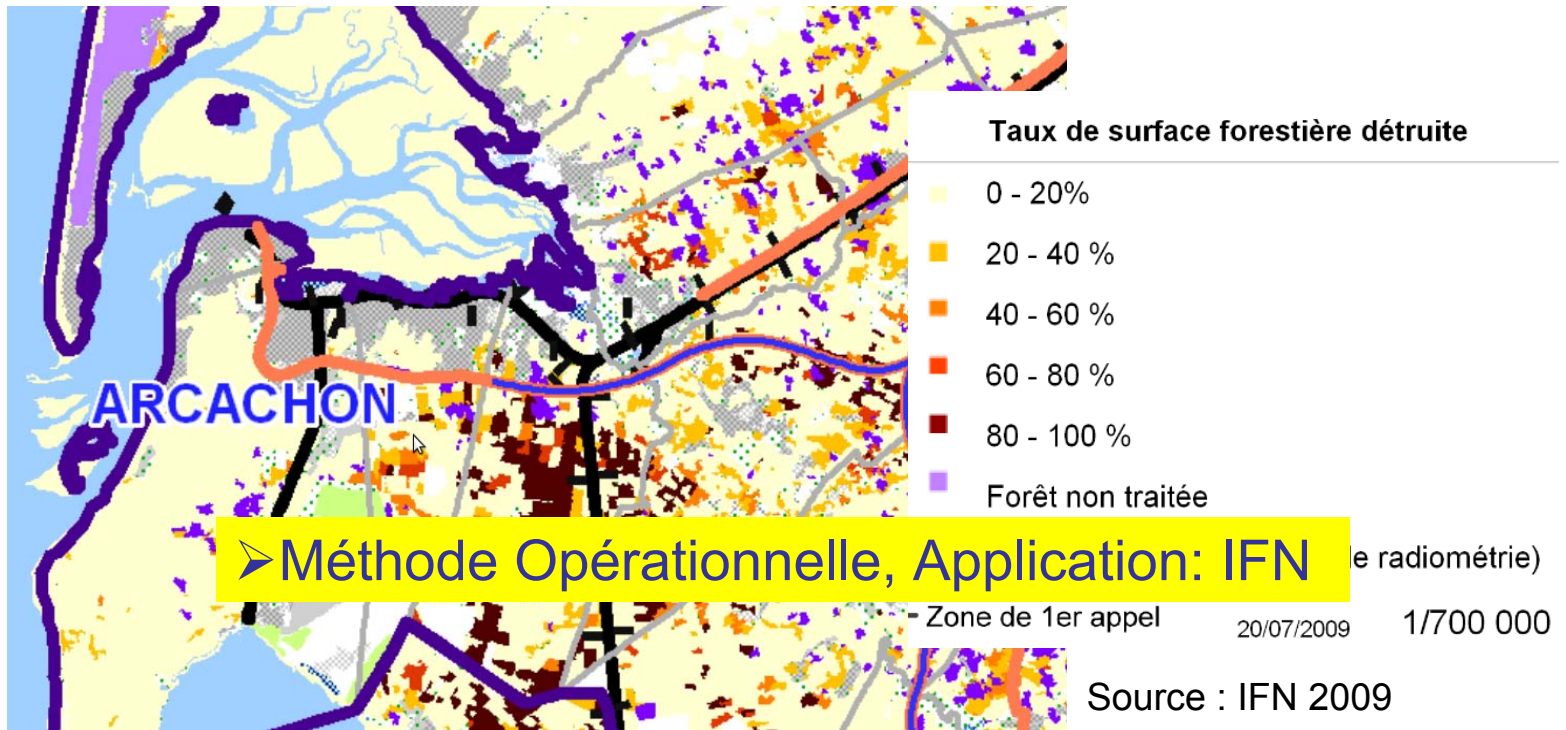
□ 0 à 20%    □ 20 à 40%    □ 40 à 60%    □ 60 à 80%    □ 80 à 100%

Echelle : 1 / 250 000



Volume de chablis en futaie de pin maritime (type CM)  
Répartition par région forestière\*  
\* Chiffres arrondis à l'importance de calcul à condition après avoir sur les planches de mesures sur le terrain

# Tempête janvier 2009: cartographie des dégâts sur la forêt landaise (IFN et Cemagref)



- images SPOT Haute Résolution (10-20m) avant et après tempête
- Détection changements pixel + segmentation orientée objet post-tempête
- Non détection des dégâts diffus (30 % dégâts) MMU = 1ha
- Carte pas assez précise pour utilisation à l'échelle des peuplements

# Quel gain attendre de la très haute résolution pour la détection des changements forestiers?

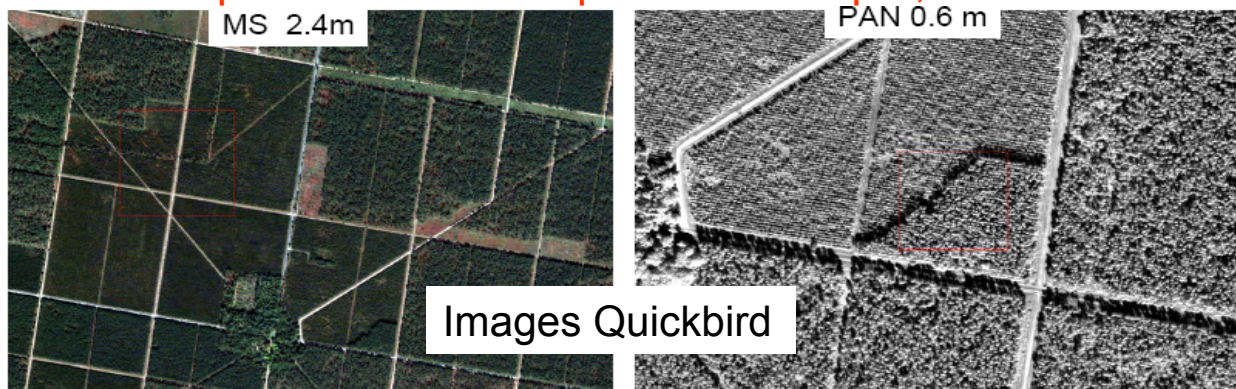
*Dégâts tempête, déboisement, coupes.....*

→ *Cartographie fine*

→ *Meilleure détection, meilleure discrimination*

***futur système satellitaire PLEIADES (fin 2011):***

***résolution spatiale : 0.7m en panchromatique, 2.8 m en multispectral***



**Étude méthodologique EGID/INRA/CNES qui a commencé en 2009**

## Exemple d'application 2: suivi phénologique des forêts à large échelle

*Phénologie des plantes :*

*étude des événements périodiques dans leur cycle de vie (feuillaison, floraison, ..),*

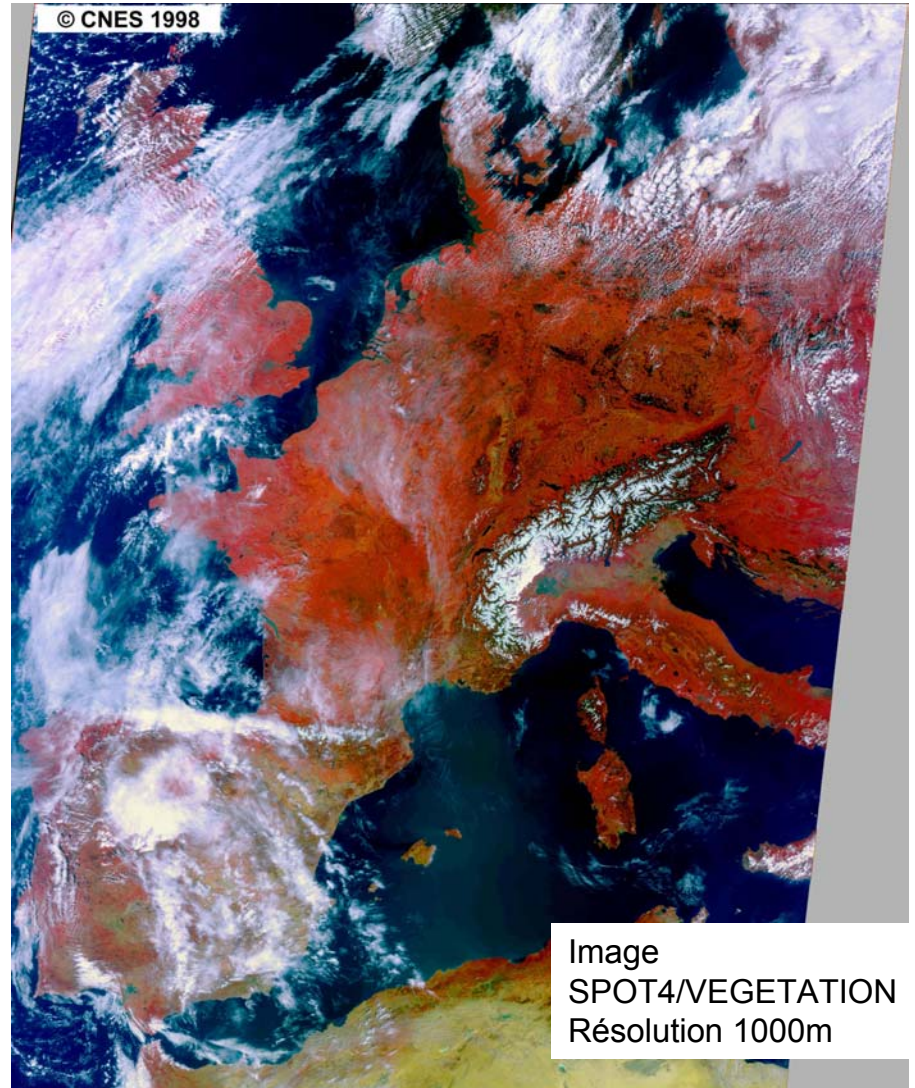
*sous l'influence de l'environnement*

*en particulier: variations saisonnière des températures et des précipitations*

**Variations interannuelles / long termr de la durée de la saison de croissance**

- suivi phénologique des forêts feuillues tempérées

- Allongement de la saison de croissance et réchauffement climatique

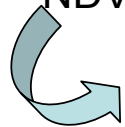




## Exemple: Suivi phénologique à large échelle

- Applications: croissance/productivité, bilan de C, bilan hydrique  
tendances long terme / changement climatique  
échelles régionales et continentales
- Données de télédétection:  
Haute fréquence temporelle: 1 jour – 1 semaine  
Basse résolution spatiale: 1 km (> peuplement)  
NOAA/AVHRR, SPOT/VEGETATION, MODIS, ....
- Approche empirique
- **Analyse des variations saisonnières de l'indice de végétation NDVI**

$$NDVI = (R_{pir} - R_{rouge}) / (R_{pir} + R_{rouge}) \quad \text{avec } R = \text{réflectance}$$



$f$  (fraction de PAR absorbé)

$\propto (1 - \exp(-k LAI))$

$\propto (LAI)$  pour LAI faible

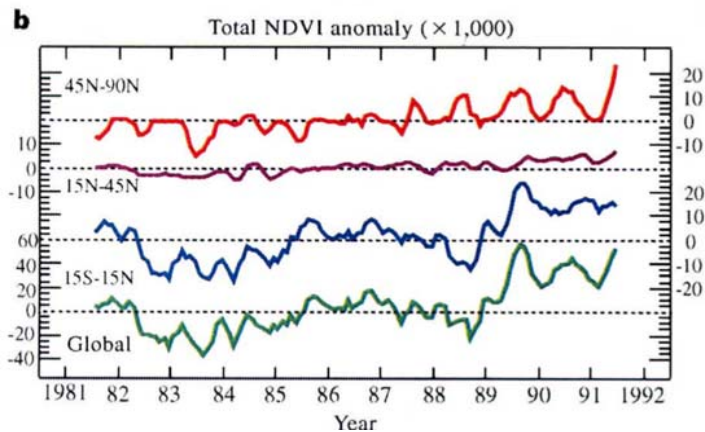
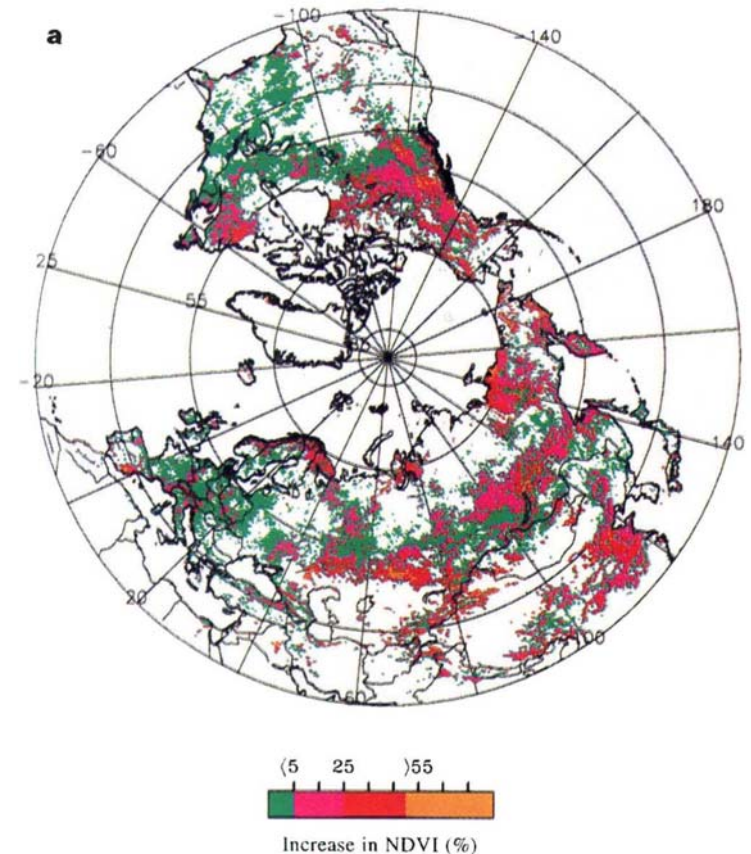
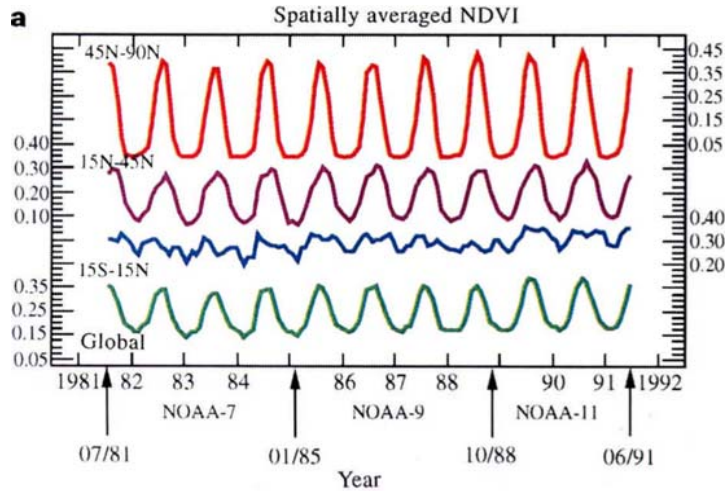


$$NDVI = f(LAI)$$

➤ Applications en Recherche

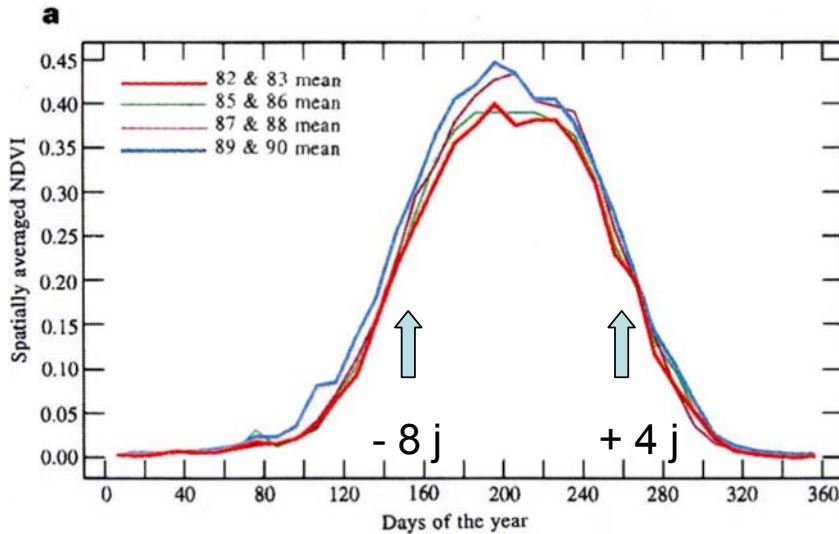
# Allongement de la saison de croissance et réchauffement climatique à l'échelle de l'hémisphère nord (1/2)

Observations: Série temporelle de données satellitaires NOAA/AVHRR



Source: Myneni et al., 1997, NATURE, vol386, 698-702

# Allongement de la saison de croissance et réchauffement climatique à l'échelle de l'hémisphère nord (2/2)

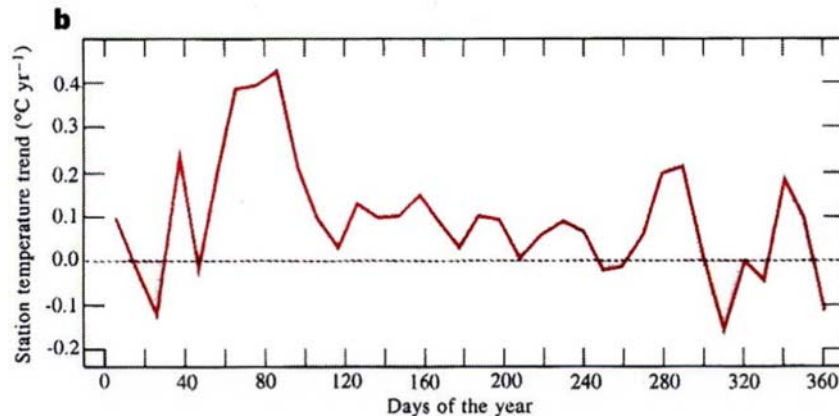


45N-90N

1981-1991

- Avance printanière =  
- 8 jours

- Recul de la fin période de croissance =  
+ 4 jours



Précision = + ou moins 2-3 jours

# Phénologie des forêts feuillues tempérées

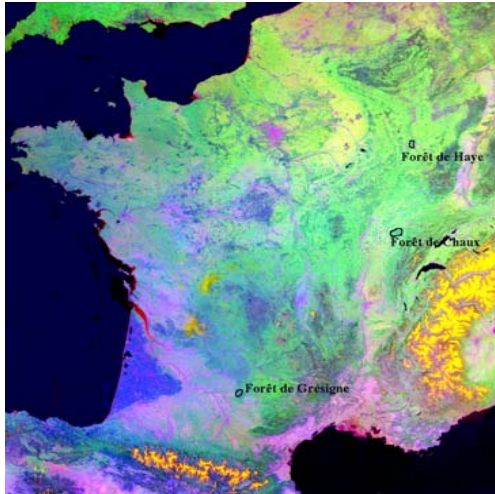
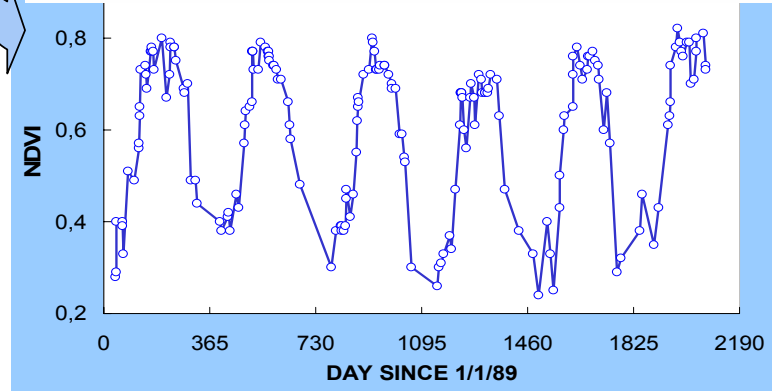
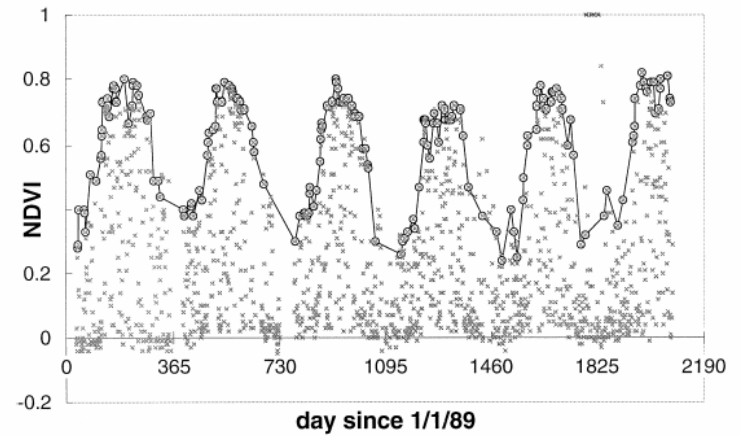


Image AVHRR/NOAA du  
13/05/1992

Composition colorée

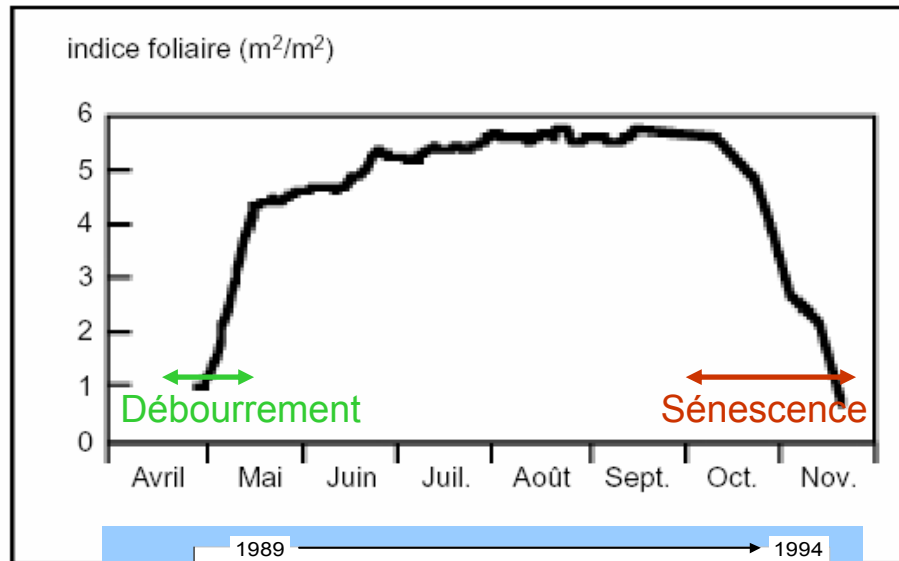
Filtrage des  
pixels  
ennuagés,  
corrections  
atmosphériques



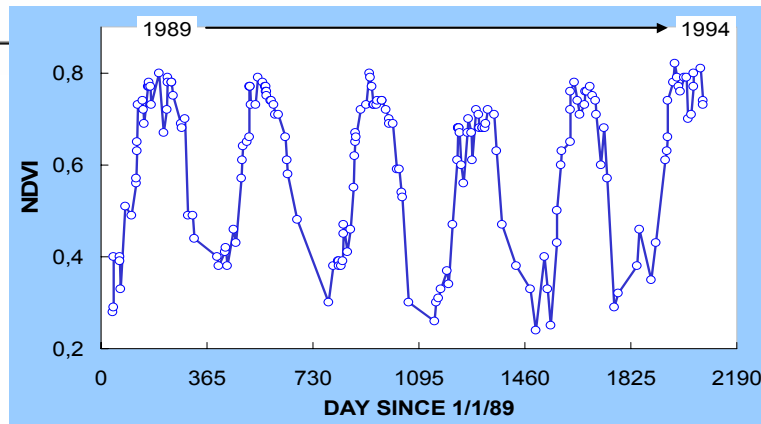
Time series of NDVI on a 50 km<sup>2</sup> forested  
area from 1989 to 1994

## Phénologie des forêts feuillues tempérées

- Sources de variation saisonnière du signal de télédétection:
  - Variations directionnelles de la réflectance: soleil, capteur
  - Cycle Phénologie



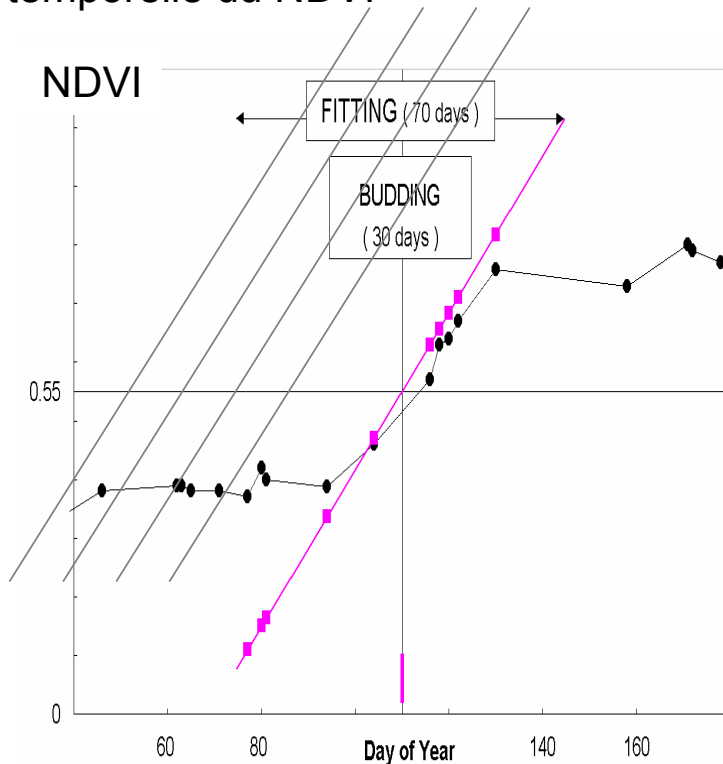
Exemple de dynamique saisonnière d'indice foliaire dans un peuplement de 35 ans de chêne sessile du Nord-Est de la France. L'augmentation observée en juin correspond à la mise en place d'une nouvelle pousse (d'après Bréda, 1999).



# Phénologie des forêts feuillues tempérées

## METHODE

- Analyse du NDVI moyen sur 3 forêts (~50 km<sup>2</sup> par forêt et uniquement pixels purs forêt)
- Effets directionnels non critiques : normalisation pas indispensable
- Datation des stades phénologiques clefs par comparaison à un modèle de variation temporelle du NDVI



- Modèle linéaire du changement de NDVI au printemps et à l'automne: centré sur 0.55  
 $NDVI=0.55 \Rightarrow 1 < LAI < 1.5$

Printemps: 0.35 à 0.75 en 30 jours  
Automne: 0.70 à 0.40 en 50 jours

- Date [(observation- modèle)=min]
- datation: Débourrement, Sénescence  
→ durée du cycle

Exemple: forêt de Chaux (chêne sessile)

Indicateurs  
phénologiques  
estimés

Phenology derived from NDVI time series

| YEAR | Budburst Day | Senescence Day | Length of Growing Season |
|------|--------------|----------------|--------------------------|
| 1989 | 124          | 303            | 179                      |
| 1990 | 129          | 288            | 159                      |
| 1991 | 144          | 294            | 150                      |
| 1992 | 128          | 282            | 154                      |
| 1993 | 115          | 275            | 160                      |
| 1994 | 109          |                |                          |
| Mean | 125          | 288            | 160                      |

Comparaison  
avec des  
observations  
au sol

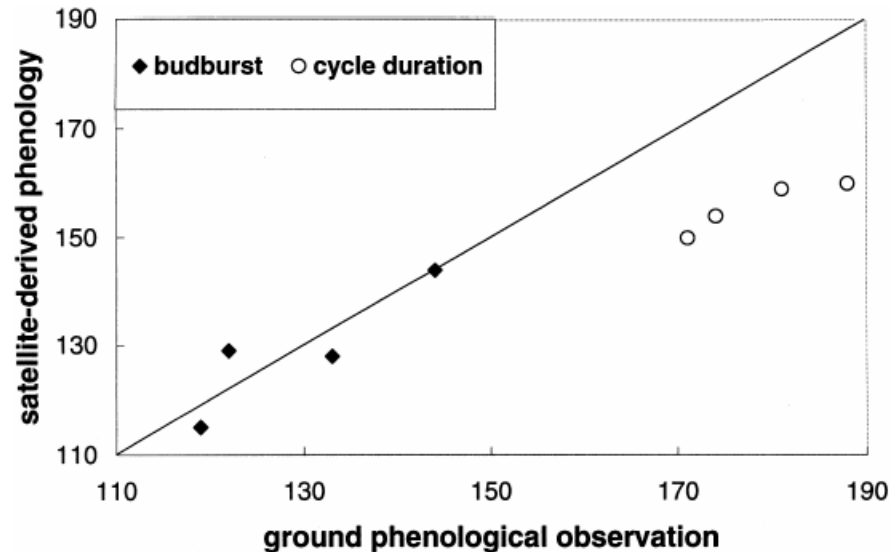


Figure 9. Satellite-derived budburst (◆) and phenological cycle duration (○) for the sessile oak Chaux forest compared to ground measurements on a nearby sessile oak stand of Champenoux forest (Bréda and Granier, 1996).

Comparison avec estimations à partir d'un modèle phénologique climatique:  
somme de températures

Cohérence spatio-temporelle des estimations par satellite: latitude, espèces

|             |              |              |
|-------------|--------------|--------------|
|             | <i>Chêne</i> | <i>Hêtre</i> |
| <i>Nord</i> | Chaux        | Haye         |
| <i>Sud</i>  | Grésigne     |              |

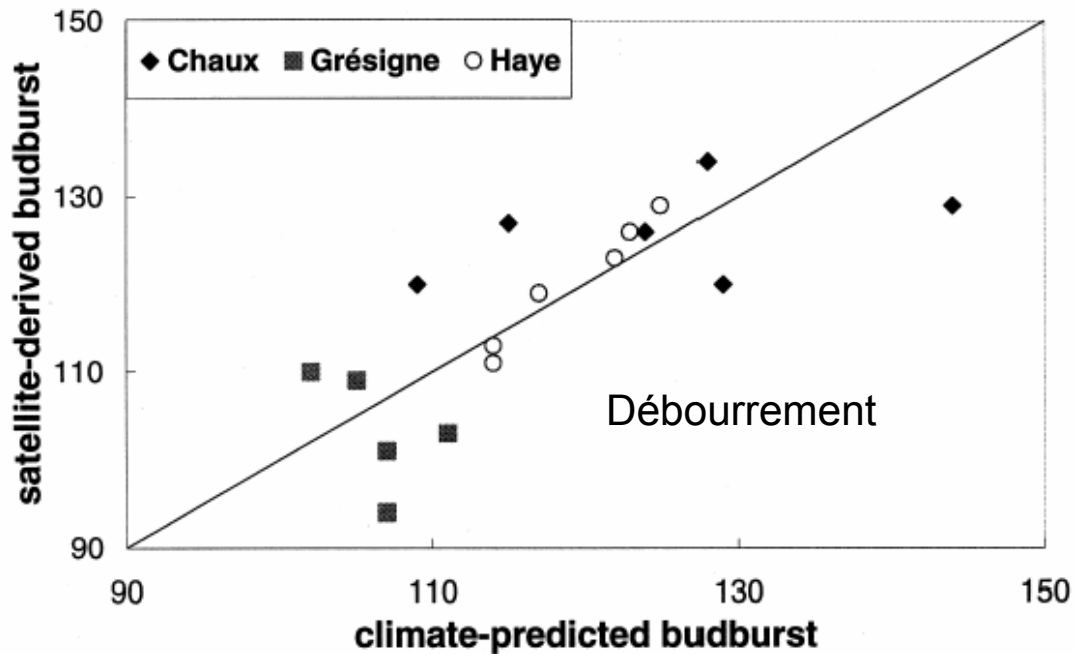


Figure 10. Satellite-derived compared to climate-predicted budburst for the three studied forests.



# Variations altitudinales de la phénologie foliaire des forêts feuillues pyrénéennes à partir de séries de données VEGETATION (1km<sup>2</sup>)

Après: *normalisation effets directionnels (modèle Roujean)*

*et désagrégation des variations saisonnières de l'indice de végétation PVI (modèle Cardot)*

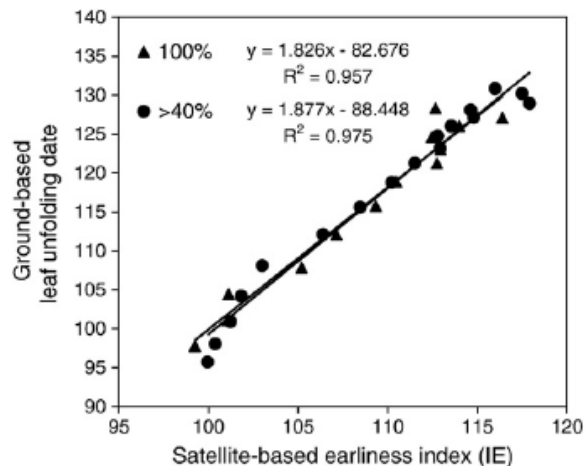
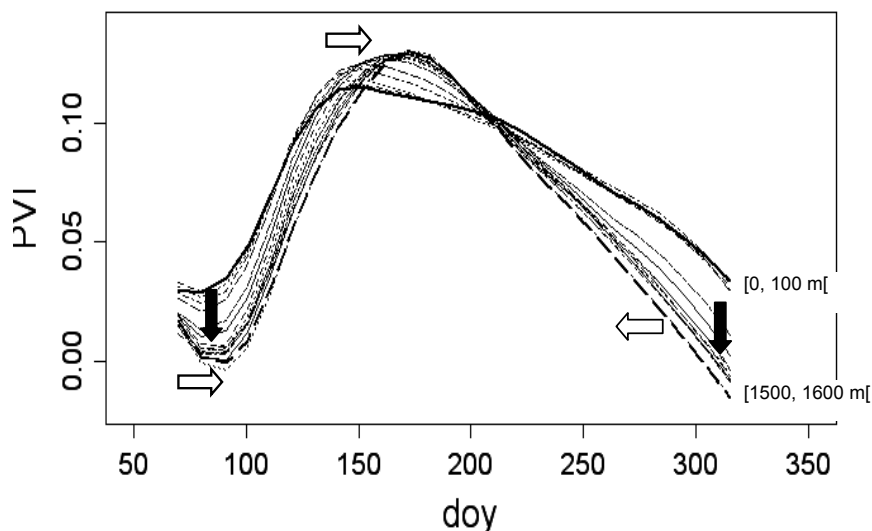
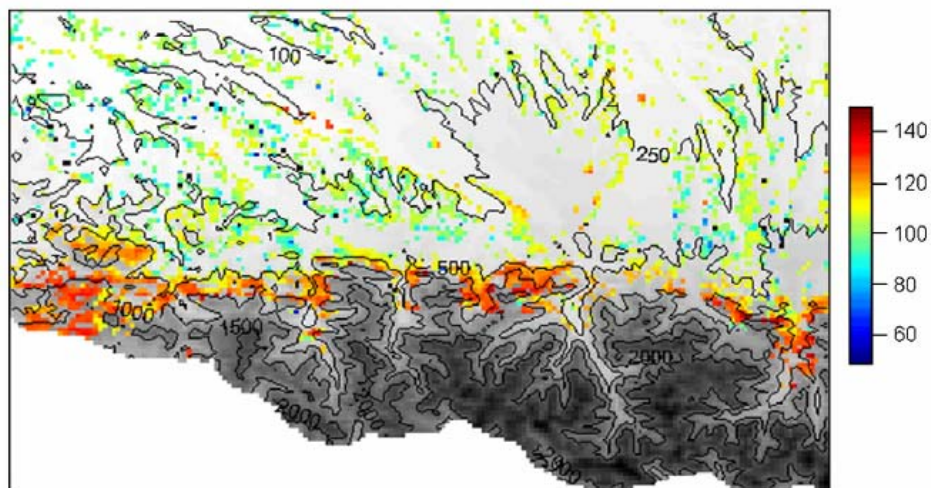
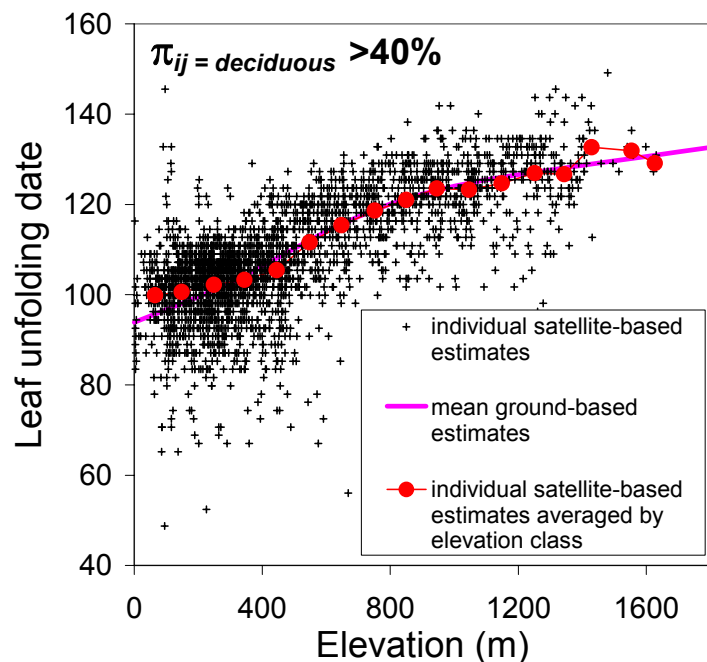


Fig. 8. Linear regression between satellite-derived earliness index (IE) and ground-based leaf unfolding date (LUD). Both are averaged by 100 m wide elevation class. Results for pixels with a fraction of deciduous broadleaf forest  $n_{j-deciduous} > 40\%$  and for pure pixels (100%). RMSE is equal to 1.8 and 2.1 days, respectively.

Variations altitudinales de la courbe saisonnière de l'indice de végétation des forêts feuillues.

# Variations altitudinales de la date de débourrement des forêts feuillues

## Moyennes sur la période 2002-2006



- Erreur sur la date débourrement pour une altitude donnée ~ 2 jours
- La gamme des variations altitudinales estimées par satellite concorde avec celle estimée au sol: ~ 40 jours de 0 à 1600m d'altitude