

ENSG

Jean-Paul RUDANT

[Rudant@univ-mlv.fr](mailto:Rudant@univ-mlv.fr)

janvier2014

Cours : Télédétections radar

<http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=94>

**Cette notice présente le plan du cours suivi d' un bref résumé de chaque séquence**

## Télédétection Radar : Plan du cours

Le cours de Télédétection Radar comporte trois volumes :

Le cours

Les applications

Les exercices

**Volume 1 : cours 3h10 +11h30 application +~4h exos= 19h**

**Cours-I-Introduction 33'**

Présentation générale du cours (6')

Séquence pour se poser des questions (10')

Présentation détaillée du cours (14')

Synthèse des prérequis (3')

**Cours-II-Généralités sur les images radar 80' = 1h20**

Autour de l'acronyme RADAR (32')

Structure de l'image (6')

Résolution spatiale (17')

Compléments résolution spatiale (19')

Compléments vidéo CNRS et CNES (5')

**Cours-III-Géométrie des images 80' 1h20**

Effets liés à la variation de l'angle d'incidence (sol plat) (6')

Effets liés à la différence entre les résolutions spatiales longitudinales et transversales (sol plat) (4')

Effets liés à la direction de visée :

Effets liés à la direction de vol du capteur et à l'orientation du faisceau (sol plat) (5')

Complément : Effets géométriques liés à l'orientation du faisceau - Cas du radar spatial, approche la plus simple pour les régions équatoriales (20')

Effets liés au relief :

Effets liés au relief (effets de pente) (14')

Autres Exemples ~14 mn

Documentaire CNRS (2')

Bilan utilisateur (5')

Comment répondre à la Question : faut il des Corrections de relief ou pas ? (9')

**Cours-IV-Radiométrie : réponse radar, caractères généraux 17+53+80+80 =230=3h50'**

Introduction 3mn

Généralités sur la réponse radar 14mn

### **Cours-IV-1-Chatoiement ou speckle**

- 1- Généralités sur le chatoiement 9mn
- 2- lois de probabilités pour l'amplitude et l'intensité 24mn
- 3- génération d'un "quicklook", image moyennée réduite 6mn
- 4- résumé sur le chatoiement-*speckle* 8mn
- 5 - illustrations 5mn

### **Cours-IV-2- Réponse radar, coefficient de rétrodiffusion**

- 1- équation radar, coefficient de rétrodiffusion 14mn
- 2- effets du relief 4 mn
- 3- les coefficients Gamma et Beta 4 mn
- 4- variabilité de  $\sigma_0$  en valeurs naturelles et en dB  $\sim 20$ mn
- 5- calibration de  $\sigma_0$  8mn
- 6- visualisation, graphiques tirages papier 30mn

### **Cours-IV-3- La Phase**

- 1-Calcul de la phase (16')
- 2-Résumé « Calcul de la phase » (5')

**Volume 2 : Applications 2+2+10+13+20+19+12= 80 +380 = 460=7h40**

Applications : Généralités

#### **Appli-1-Introduction (2')**

#### **Appli-2-Rappels des propriétés essentielles des images (74')**

- Effets du relief (10')
- Ondes cohérentes (13')
- Réponse Radar (20')
- Question : faut il privilégier l'Optique ou le Radar ? (19')
- Capteurs et images disponibles, d'archives et actuelles (12')

#### **Appli-3-Applications des images d'amplitude (140')**

- Sols nus, notion de rugosité (29')
- Pénétration dans les sables secs, effets de l'humidité, cartographie des inondations, banquise, pack glaciaire (21')
- Détour vers l'océan (effets de l'agitation de la surface) (13')
- Littoral et bathymétrie (13')
- Question de vocabulaire, diffusion de surface, de volume, double réflexion (7')
- Aperçu sur l'agriculture, exemple de synergie avec l'optique (5')
- Géomorphologie et géologie (13')
- Zones Bâties (6')
- Cartographie, notion de capacité de détection (35')

#### **Appli-4-Applications utilisant la phase de la réponse radar : l'interférométrie (85')**

- Introduction (2')
- Principes (3')
- Modélisation et mesure de la différence de phase  $\Delta \Phi$  (29')
- Les sources d'erreur ou de « bruit » affectant  $\Delta \Phi$  (5')
- Les applications de l'interférométrie :
  - Mesure des altitudes (15')
  - Mesure de déplacements de la surface du sol (6')
  - Facteur de Cohérence (8')
- Les développements « récents » : les réflecteurs permanents (8')

#### **Appli-5-Applications utilisant la phase de la réponse radar : la polarimétrie 50'**

- Introduction (2')

Approche expérimentale historique (6')  
Capteurs satellitaires 1991-2007 (15')  
Les Capteurs « récents » (depuis 2007) (23')  
Conclusion et exemple d'une analyse d'images aéroportées multibandes (4')

### **Appli-6-Exposés transversaux :**

#### **Appli-6-1-Modes d'extraction du relief à partir des images radar (33')**

Introduction  
Radarclinométrie  
Radargrammétrie  
Interférométrie  
Conclusion

#### **Appli-6-2-Etude des couverts végétaux 70'**

Introduction, plan de l'exposé (3')  
Introduction (2) :  
cas de l'Afrique vue par le diffusiomètre de ERS1 (effets conjugués de la végétation et de l'humidité)(8')  
Approches quantitatives actuelles (33')  
Perspectives futures (4')  
Applications cartographiques (7')  
Très haute résolution spatiale (1')  
Activités anthropiques (agriculture itinérante, brulis, chantiers) (7')  
Compléments et Remarques (traitement d'image, classifications, orage et pluie...)(4')  
Conclusion (2')

### **Volume 3 : exercices**

#### **Exo-1-Généralités**

- 1) Rappels sur les Mouvements vibratoires
- 2) Polarisations rectilignes H, V et elliptique
- 3) Réflexion d'une onde polarisée rectilignement sur une surface plane
- 4) Effet de la pente sur la Résolution transversale au sol
- 5) Cellule de résolution : représentation 3D
- 6) Rôle de l'Effet Doppler dans l'amélioration des résolutions longitudinale et transversale
- 7) Rappel d'orbitographie
- 8) Rappel sur les orbites héliosynchrones
- 9) Expérimentation simple permettant d'appréhender la notion de résolution spatiale et sa relation avec la taille du pixel (en optique)
- 10) Discussion autour de la notion de cohérence
- 11) Rappel général sur l'Effet Doppler
- 12) Discussion autour de l'Effet Doppler dans le cas des images radar
- 13) Relation entre FRI (Fréquence de répétition des impulsions) et géométrie des acquisitions
- 14) Cible particulière à forte réponse : le dièdre droit d'arête perpendiculaire au faisceau
- 15) Décalage Doppler : Comportement des cibles mobiles au sein d'une image

#### **Exo-2-Géométrie des images**

- 1) Terre plate et terre : quel impact sur certains calculs géométriques

- 2) Comparaison entre la direction réelle d'un linéament et sa direction perçue dans l'image en géométrie radar
- 3) Système de projection dit de « La plate carrée »
- 4) Entre deux images d'une région de relief marqué, choisir celle qui correspond à l'incidence la plus faible
- 5) Corrections de relief : quel impact pour les défauts du MNT utilisé
- 6) Sur une image de la Tour Eiffel, déterminer l'incidence du faisceau
- 7) Effets de la pente sur la surface des pixels en géométrie radar
- 8) Effets de la pente sur l'échelle de restitution en l'absence de corrections géométriques

### **Exo-3-Interférométrie**

- 1) Calcul de la différence de phase en fonction de l'altitude
- 2) Exemple de Cibles pouvant être des réflecteurs permanents
- 3) Visualisation de l'image des différences de phase
- 4) Incertitudes sur les mesures d'altitude et de déplacements
- 5) Valeur maximale de B perpendiculaire pour ne pas trop dégrader le facteur de cohérence
- 6) Propriétés générales du facteur de Cohérence

## **Téledétection Radar : Résumé associé à chaque séquence** *rouge et italique*

**Volume 1 : cours 3h10 +11h30 application +~4h exos= 19h**

### **Introduction 33'**

- Présentation générale du cours (6')
- Séquence pour se poser des questions (10')
- Sont regroupés ici des exemples montrant l'originalité des images radar, quelquefois sans équivalent en optique*
- Présentation détaillée du cours (14')
- Synthèse des prérequis (3')

### **Généralités sur les images radar 80' = 1h20**

- Autour de l'acronyme RADAR (32')
- Explication générales sur le système Radio Detection and Ranging, ondes électromagnétiques, mode de fonctionnement, longueurs d'ondes centimétriques, principales propriétés*
- Structure de l'image (6')
- Acquisition de lignes les unes après les autres*
- Résolution spatiale (17')
- Présentation de la résolution spatiale d'un radar qui fonctionnerait selon des principes physiques sans étapes de traitement de signal complémentaires.*
- Compléments résolution spatiale (19')
- Présentation des traitements qui vont permettre d'améliorer la résolution spatiale, opération indispensable pour les capteurs qui orbitent à plusieurs centaines de km de la surface*

Compléments vidéo CNRS et CNES (5')

*Extraits de film vidéo illustrant les concepts précédents.*

## **Géométrie des images 80' 1h20**

Effets liés à la variation de l'angle d'incidence (sol plat) (6')

*Sur un sol plat, l'angle d'incidence varie le long de la fauchée, d'autant plus que l'antenne est proche du sol. La résolution spatiale transversale au sol variant proportionnelle au facteur  $1/\sin(i)$ , la qualité de restitution sera meilleure pour les points du sol les plus éloignés de l'antenne. Dans le cas d'une restitution à l'écran ou sur papier, en l'absence de régularisation des tailles de pixels transversaux, l'échelle varierait le long de la fauchée et étant plus grande (plus de détail) pour les points les plus éloignés. Propriété inverse de celle rencontrée en optique.*

Effets liés à la différence entre les résolutions spatiales longitudinales et transversales (sol plat) (4')

*Même effet que précédemment mais cette fois ci entre les deux directions orthogonales transversale et longitudinale lors d'une restitution. La direction ou la taille du pixel est la plus grande apparait comprimée par rapport à l'autre (moins de pixels pour une même distance)*

Effets liés à la direction de visée :

Effets liés à la direction de vol du capteur et à l'orientation du faisceau (sol plat) (5')

*Selon l'azimut de la direction de déplacement de l'antenne et la direction de visée, gauche ou droite, les images couvriront des surfaces différentes au sol. Cette séquence discute des corrections à apporter à l'image visualisée sur un écran pour se rapprocher d'une projection cartographique.*

Complément : Effets géométriques liés à l'orientation du faisceau - Cas du radar spatial, approche la plus simple pour les régions équatoriales (20')

*Discussion autour de l'effet de l'inclinaison des orbites héliosynchrones et de la rotation de la terre sur la trace au sol des images.*

Effets liés au relief :

Effets liés au relief (effets de pente) (14')

*Discussion sur les effets de pente sur la surface d'un pixel. Une pente orientée vers le radar correspond à une dimension transversale de pixel sol plus grande (en inversement plus faible si la pente est opposée). Le facteur qui joue un rôle important est*

*$1/\sin(\text{incidence locale}) \sim [1/\sin(\text{incidence-pente})]$ , pente comptée algébriquement, positive face à l'antenne, négative de l'autre côté.*

Autres Exemples ~14 mn

*Nouvelles illustrations*

Documentaire CNRS (2')

*Illustration sur le massif de la Sainte Victoire en Provence*

Bilan utilisateur (5')

*Discussion autour des questions évoquées précédemment*

Comment répondre à la Question : faut il des Corrections de relief ou pas ? (9')

*Discussion autour du choix auquel est confronté l'utilisateur, travailler avec l'image initiale présentant des compressions dilatations dues au relief ou avec une image*

*corrigée (grâce à un MNT disponible) qui rapproche sa géométrie d'une projection cartographique.*

## **Radiométrie : réponse radar, caractères généraux 17+53+80+80 =230=3h50'**

Introduction 3mn

*Présentation du plan du chapitre. Quelles informations peut-on trouver dans les images radar ? De nature radiométrique dépendant de paramètres liés à la surface et des caractéristiques de l'onde, et géométrique (voir chapitre géométrie)*

Généralités sur la réponse radar 14mn

*L'analyse peut être faite en recherchant des propriétés de l'image en tant que matrice de points ou à partir de lois physiques permettant d'interpréter la réponse observée autour d'un point du sol donné. Donc une réponse qui peut donner lieu à du traitement d'image ou à de l'interprétation physique de mesures.*

### **Chatoiement ou speckle**

1- Généralités sur le chatoiement 9mn

*Explications relatives au phénomène d'interférence conduisant à des réponses d'amplitudes variables pour plusieurs cibles selon les différences de phase entre les divers échos*

2- lois de probabilités pour l'amplitude et l'intensité 24mn

*Calcul détaillé pour aboutir à la loi de probabilité de l'amplitude correspondant au signal sommation des échos de nombreuses cibles élémentaires présentes dans un pixel.*

3- génération d'un "quicklook", image moyennée réduite 6mn

*Réalisation d'une image de taille réduite après avoir effectué une moyenne sur des voisinages carrés ( $n \times n$ ) pour chaque pixel, moyenne suivie d'un sous échantillonnage ( $1/n, 1/n$ )*

4- résumé sur le chatoiement-speckle 8mn

*Rappel des principaux résultats concernant le chatoiement-speckle*

5 - illustrations 5mn

*Divers exemples d'effets liés au chatoiement*

### **Réponse radar, coefficient de rétrodiffusion**

1- équation radar, coefficient de rétrodiffusion 14mn

*Discussion autour de l'équation relative à la puissance mesurée pour un pixel donné. Il s'agit en fait d'une espérance (valeur moyenne des valeurs entachées de chatoiement). Introduction du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_0$  comme le rapport ( surface équivalente radar / surface du pixel ) en prenant en compte la manière d'opérer des radaristes.*

*Le coefficient  $\sigma_0$  varie comme la puissance (ou intensité) divisé par la surface du pixelSol (et donc comme le carré de l'amplitude divisé par la surface du pixelSol).*

2- effets du relief 4 mn

*Traite de l'influence de la taille du pixel sur la puissance (moyenne) mesurée pour un état de surface donné*

3- les coefficients Gamma et Beta 4 mn

*Alors que le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_0$  est relatif à la surface du pixel sol, les coefficients introduits prennent en compte la surface du pixel projetée dans la géométrie radar ou sa surface apparente du point de vue de l'antenne*

4- variabilité de  $\sigma_0$  en valeurs naturelles et en dB = 20mn à peu près

*Discussion autour des valeurs naturelles de  $\sigma_0$  pour différents milieux et des valeurs correspondantes en dB.*

5- calibration de  $\sigma_0$  8mn

*Explication sur la manière de passer des valeurs numériques codées pour un pixel à la valeur physique du coefficient  $\sigma_0$  en prenant en compte des métadonnées*

6- visualisation, graphiques tirages papier 30mn

*Discussion sur les questions de visualisation ( passage d'un codage en 16bits par pixel à 8 bits pour la visualisation) , de graphiques en dB (compression logarithmique de valeurs nécessaire compte tenu de la très grande dynamique des puissances radar observées sur différents milieux*

## **La Phase**

*Explication concernant le terme de phase apparaissant dans la réponse globale d'un pixel. Mesurée Modulo  $2\pi$ , la phase varie beaucoup d'un pixel à un autre lorsque l'on considère un pixel constitué de plusieurs cibles distribuées aléatoirement sur un pixel de grande taille par rapport à la longueur d'onde.*

1-Calcul de la phase (16')

2-Résumé « Calcul de la phase » (5')

**Volume 2 : applications 2+2+10+13+20+19+12= 80 +380 = 460=7h40**

Applications : Généralités

### **Introduction (2')**

*Présentation générale des sujets traités et des rappels en vue de permettre d'aborder les applications sans se plonger dans la totalité des chapitres précédents*

### **Rappels des propriétés essentielles des images (74')**

Effets du relief (10')

*Influence de la variabilité de la surface du pixel (essentiellement due au changement de résolution spatiale transversale par rapport au sol) et de l'incidence locale sur la mesure*

Ondes cohérentes (13')

*L'usage d'une onde cohérente (stabilité en phase) provoque des phénomènes d'interférence qui affectent la somme des réponses des cibles élémentaires présentes dans un pixel Sol. Il en résulte un effet de chatoiement (speckle en anglais, terme d'usage banalisé) qui provoque une grande variabilité de la réponse entre pixels voisins sur une zone homogène dont les propriétés macroscopiques sont identiques (par ex, un terrain de foot-ball).*

Réponse Radar (20')

*Discussion autour du coefficient de rétrodiffusion, de la surface du pixel pour les surfaces naturelles, de la surface équivalente radar pour des cibles dominantes. Rappels des effets du relief et de l'existence d'un coefficient directionnel pour la répartition de l'énergie rétrodiffusée par un pixel Sol dans l'espace.*

Question : faut-il privilégier l'Optique ou le Radar ? (19')

*Comparaison sur plusieurs exemples de couples d'images , **optique** (enregistrements liés aux réflectances dans divers canaux, image proche du sens d'une vision augmentée dans la mesure où l'on rend « visible » certaines radiations invisibles comme le PIR) et **radar** pour lequel la mesure prend en*

*compte des paramètres plus proches du sens du toucher (rugosité, humidité, nature du matériau, structure et nature de la végétation).*

*Est mise ici en évidence la complémentarité des deux types d'images, alors qu'en première impression nous pourrions penser que ce sont des images contradictoires.*

Capteurs et images disponibles, d'archives et actuelles (12')

*Bilan sur les capteurs spatiaux depuis ERS en 1991 jusqu'au lancement de Sentinel1 en 2014, satellite de l'agence spatiale européenne dont les images sont libres d'accès et gratuites. Les capteurs Hors service ne doivent pas être ignorés car leurs archives sont importantes et utiles pour les études touchant aux périodes antérieures et pour mener des suivis temporels sur de longues périodes.*

**Applications des images d'amplitude (140' )**

*Ces applications sont relatives à l'image dite d'amplitude (c.a.d. le module si l'on choisit d'exprimer la mesure radar sous forme d'un nombre complexe). Les analyses portent soit sur l'amplitude, soit sur l'intensité (amplitude au carré) proportionnelle à la puissance reçue par l'antenne. Subtilité de vocabulaire entre les termes énergie et puissance (énergie=puissance\*durée) mais sans incidence sur l'exploitation des images. Le coefficient de rétrodiffusion, souvent évoqué dans les interprétations est un coefficient sans dimension qui au sein d'une image suit les variations de l'intensité (ou puissance mesurée) divisée par la surface du pixelSol.*

*Selon les exemples traités sera mise en évidence l'influence des paramètres qui influent sur le niveau de l'amplitude (ou intensité) mesurée. Emergerons ici les caractéristiques physiques de la surface (rugosité, humidité ...), de l'occupation végétale, des effets de pente (qui jouent sur la taille du pixelSol), et bien entendu celles du faisceau radar utilisé (longueur d'onde, polarisation, direction de visée). Ce qui vient d'être dit concerne en particulier l'exploitation numérique des images sur support informatique ; par exemple l'usage d'algorithmes dédiés à l'extraction automatique d'objets géographiques, ou segmentation en vue de classifications suivies de la génération de cartes..*

*L'exposé qui suit s'appuiera principalement (comme souvent lorsque l'on souhaite analyser le contenu informatif d'images) sur une interprétation visuelle. Petite complication à ce niveau. En plus des paramètres évoqués précédemment, le mode de visualisation joue un rôle non négligable. Prenons l'exemple simple d'une image monocanal en niveaux de gris. Les écrans permettent une dynamique de représentation sur 8bits (256 niveaux) alors que (en général) les valeurs numériques des images RADAR sont codées sur 16 bits pour prendre en compte la très grande dynamique des échos radar. Il résulte de cette compression de dynamique (quelquefois non perçue par un observateur non averti) une saturation des zones de forte réponse qui apparaîtront sous forme d'une tache blanche dénuée de détails. (c'est un phénomène rencontré fréquemment pour les zones bâties).*

Sols nus, notion de rugosité (29')

Pénétration dans les sables secs, effets de l'humidité, cartographie des inondations, banquise, pack glaciaire (21')

Détour vers l'océan (effets de l'agitation de la surface) (13')

Littoral et bathymétrie (13')



Question de vocabulaire, diffusion de surface, de volume, double réflexion (7')

Aperçu sur l'agriculture, exemple de synergie avec l'optique (5')

Géomorphologie et géologie (13')

*En géomorphologie, la pente joue un rôle important sur la puissance enregistrée pour un pixel. Le niveau des réponses varie beaucoup avec la surface du pixel (cf & « Radiométrie ») et de manière moindre avec l'angle d'incidence local qui influence le coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma_0$  s'accroît quand l'incidence locale diminue).*

Zones Bâties (6')

*Les réponses sont en général élevées du fait de l'existence de cibles anthropiques dominantes. Comme discuté précédemment, la compression  $16b \Rightarrow 8b$  lors de la visualisation gomme les contrastes pour les zones de fort niveau, ce qui fait souvent apparaître les zones urbaines comme des taches de forte clarté uniforme.*

Cartographie, notion de capacité de détection (35')

*A la différence de l'imagerie optique, les réponses radar pour un pixel peuvent être fortement influencées par des objets de taille beaucoup plus petite que le pixelsol en question. On parle alors de capacité de détection. Pour un pixel décimétrique, cela correspond en général à un objet décimétrique dont les différentes parties renvoient vers l'antenne des échos en phase, ce qui produit des interférences constructives dont l'intensité est très élevée.*

## **Applications utilisant la phase de la réponse radar : l'interférométrie (85')**

Introduction (2')

*Ce chapitre concerne l'usage de couples (ou de séries) d'images pour les applications dites interférométriques ou la cohérence de phase entre plusieurs acquisitions (simultanées ou non-simultanées) est mise à profit dans le calcul de la corrélation entre les mesures (module+ phase) des deux acquisitions. Il en résulte 3 principales voies d'usage basées sur le calcul des différences de phase observée entre 2 acquisitions pour un ensemble de pixels voisins :*

*Il est ainsi possible d'obtenir:*

*- une cartographie du relief dans la géométrie de l'image radar sous forme de sortes de courbes de niveau (modulo un  $\Delta H$  nommé altitude d'ambiguïté)  
- une cartographie des déplacements de la surface (projetés sur la direction de visée) entre deux acquisitions non simultanées avec une précision d'une fraction de longueur d'onde (resultat brut modulo  $\lambda/2$ , donc également un système franges )*

*- une cartographie indiquant si les cibles élémentaires présentes au sein d'un pixel ont subi des déplacements désordonnés les unes par rapport aux autres entre les deux acquisitions du couple d'images utilisé. Cette « mesure » de stabilité de surface au sein d'un pixel est fournie par le « facteur de cohérence » et est appréciée à l'échelle de la longueur d'onde. Plus le facteur est proche de 1, plus la stabilité intra pixel est élevée. Notons que lorsque la surface subit un déplacement d'ensemble, comme cela a été évoqué précédemment, le facteur de cohérence conserve alors une valeur élevée si la configuration globale des -cibles élémentaires est restée quasiment la même.*

*Un facteur de cohérence élevé garantit de « bonnes » mesures (peu bruitées) lors de l'évaluation des déplacements évoquée à l'& précédent.*

*Les techniques récentes dites de PS sélectionnent les pixels ayant des propriétés géométriques et diélectriques telles que leurs comportement en terme de phase présentent une grande stabilité. Ce sont des points « en qui l'on peut avoir*

*confiance ». Avec ces techniques, la précision de mesure des déplacements est meilleure que le dixième de la longueur d'onde.*

Principes (3')

Modélisation et mesure de la différence de phase  $\Delta\phi$  (29')

Les sources d'erreur ou de « bruit » affectant  $\Delta\phi$  (5')

Les applications de l'interférométrie :

Mesure des altitudes (15')

Mesure de déplacements de la surface du sol (6')

Facteur de Cohérence (8')

Les développements « récents » : les réflecteurs permanents (8')

### **Applications utilisant la phase de la réponse radar : la polarimétrie (50')**

Introduction (2')

*La capacité des antennes à émettre des ondes « polarisées », cad pour lesquelles il est possible de prévoir le comportement du vecteur champ électrique au cours de la propagation ouvre la voie de l'usage de images dites polarimétriques. La configuration est au départ simplifiée par rapport au cas général car les antennes sont capables d'émettre et recevoir deux polarisations particulières, l'une dite H (direction du champ E perpendiculaire au plan d'incidence), l'autre dite V (direction du champ E parallèle au plan d'incidence. (soit au total 4 possibilités HH, HV, VH, VV dont il convient d'en soustraire une car pour les radar monostatiques (antenne reception= antenne d'emission), alors HV=VH). En combinant les échos (module+phase) reçus pour ces deux polarisations et en jouant sur les différences de phase à l'émission entre H et V, il est possible de générer toute les polarisations elliptiques et de calculer les réponses correspondantes de la surface terrestre. Ce type d'analyse donne lieu à des développements de physique mathématique très poussés, basés sur le calcul matriciel, pour tenter de mettre en évidence des comportements spécifiques des cibles.*

*Dans la présentation qui suit, nous nous contenterons de présenter les résultats expérimentaux obtenus depuis 1991 avec le satellite ERS en progressant selon la nature des capteurs vers les configurations dites « pleinement polarimétriques ». Différentes combinaisons de canaux HH, HV, VV prenant en compte les différences de phase intercanaux, permettent alors de mettre en évidence certains structures de cibles (par exemple , pour la végétation : végétation rase, végétation dense, végétation inondée. Différenciation très utile pour de nombreuses applications). En conclusion, un exemple issu d'images aéroportées démontre que la capacité de pénétration des ondes croit avec la longueur d'onde et que les types de structures végétales évoquées précédemment peuvent être vus à des profondeurs différentes selon la longueur d'onde (bande P 60cm, bande L 25 cm, bande C 6cm)*

Approche expérimentale historique (6')

Capteurs satellitaires 1991-2007 (15')

Les Capteurs « récents » (depuis 2007) (23')

Conclusion et exemple d'une analyse d'images aéroportées multibandes (4')

### **Exposés transversaux :**

Modes d'extraction du relief à partir des images radar (33')

Introduction

*Les deux premiers modes opératoires envisagés ici Radar Clinométrie et Radar Grammétrie peuvent être considérés comme communs avec*

*l'imagerie optique ou elles sont respectivement intitulées clinométrie et photogrammétrie.*

*Pour la Clinométrie, que ce soit en radar ou en optique, la mesure dépend de l'orientation des pentes par rapport à la source d'énergie et de la position du capteur. Dans le cas du radar monostatique, source et capteur sont confondus.*

*D'un point de vue numérique, modéliser la réponse au niveau capteur en fonction des différents paramètres de prise de vue permet ensuite par inversion de déterminer la pente, puis par intégration l'altitude des points du sol.*

*S'il s'agit de photointerprétation, l'alternance de zones plus claires et plus sombres est interprétée par l'opérateur comme un effet de relief, mais sans garantie de ne pas confondre talweg et crête. Cette dernière remarque est à prendre particulièrement en compte dans le cas du radar.*

*Dans le cas de la « grammétrie », la photogrammétrie est en général opérée à partir de deux « points de vue capteur » opposés (alors que la source d'éclairage est restée au même endroit) pour augmenter la parallaxe, alors qu'en radargrammétrie, la seule possibilité réside dans des acquisitions du même côté pour éviter des inversions de radiométrie qui résulteraient d'une inversion de direction de visée pour le faisceau. Cette inversion rendrait impossible la recherche de points homologues. Première conséquence, la parallaxe est plus faible en radargrammétrie qu'en photogrammétrie et les résultats sont moins précis.*

*La méthode Interférométrie propre au radar n'a pas d'équivalent enoptique. Elle est basée sur le calcul d'une différence de phase entre deux images acquises sur des orbites voisines, différence de phase proportionnelle à l'altitude des points du sol. Notons que cette différence de phase est calculée (modulo  $2\pi$ ), ce qui produit des franges proches de courbes de niveau.*

Radarclinométrie

Radargrammétrie

Interférométrie

Conclusion

## Etude des couverts végétaux 70

Introduction, plan de l'exposé (3')

*L'analyse des couverts végétaux (structure, biomasse, ...) est une application où l'imagerie radar est susceptible d'apporter de nombreux résultats originaux. Plusieurs raisons peuvent être évoquées : selon la longueur d'onde, les images ne percevront pas les structures de la même manière car la profondeur de pénétration croît avec cette dernière ; les combinaisons polarimétriques pour une longueur d'onde donnée sont susceptibles de générer des signatures spécifiques (cf & polarimétrie). Les signatures précédentes évolueront dans certains cas avec le temps et pourront traduire de manière pertinente les changements intervenus entre deux dates (déforestation, dégradation, variations saisonnières, inondations..)*

*L'exposé qui suit tentera de montrer, au travers de l'exemple à très petite échelle du suivi du sahel, la difficulté que l'on peut rencontrer à séparer ce qui peut être dû à une variation d'humidité et à une variation de*

biomasse dans ce cas des savanes. L'état de la végétation et la biomasse fourragère dépendent alors beaucoup de la pluviométrie et donc de l'humidité.

Suivront des exemples quantitatifs et cartographiques dans différentes configurations moins délicates à interpréter.

Introduction (2) : cas de l'Afrique vue par le diffusiomètre de ERS1 (effets conjugués de la végétation et de l'humidité)(8')

Approches quantitatives actuelles (33')

Perspectives futures (4')

Applications cartographiques (7')

Très haute résolution spatiale (1')

Activités anthropiques (agriculture itinérante, brulis, chantiers) (7')

Compléments et Remarques (traitement d'image, classifications, orage et pluie...)(4')

Conclusion (2')

### Volume 3 : exercices

*Les énoncés d'exercice suivront bientôt, ils sont actuellement rappelés en début de correction*

#### Généralités

- 1) Rappels sur les Mouvements vibratoires
- 2) Polarisations rectilignes H, V et elliptique
- 3) Réflexion d'une onde polarisée rectilignement sur une surface plane
- 4) Effet de la pente sur la Résolution transversale au sol
- 5) Cellule de résolution : représentation 3D
- 6) Rôle de l'Effet Doppler dans l'amélioration des résolutions longitudinale et transversale
- 7) Rappel d'orbitographie
- 8) Rappel sur les orbites héliosynchrones
- 9) Expérimentation simple permettant d'appréhender la notion de résolution spatiale et sa relation avec la taille du pixel (en optique)
- 10) Discussion autour de la notion de cohérence
- 11) Rappel général sur l'Effet Doppler
- 12) Discussion autour de l'Effet Doppler dans le cas des images radar
- 13) Relation entre FRI (Fréquence de répétition des impulsions) et géométrie des acquisitions
- 14) Cible particulière à forte réponse : le dièdre droit d'arête perpendiculaire au faisceau
- 15) Décalage Doppler : Comportement des cibles mobiles au sein d'une image

#### Géométrie des images

- 1) Terre plate et terre : quel impact sur certains calculs géométriques
- 2) Comparaison entre la direction réelle d'un linéament et sa direction perçue dans l'image en géométrie radar
- 3) Système de projection dit de « La plate carrée »
- 4) Entre deux images d'une région de relief marqué, choisir celle qui correspond à l'incidence la plus faible
- 5) Corrections de relief : quel impact pour les défauts du MNT utilisé
- 6) Sur une image de la Tour Eiffel, déterminer l'incidence du faisceau
- 7) Effets de la pente sur la surface des pixels en géométrie radar

8) Effets de la pente sur l'échelle de restitution en l'absence de corrections géométriques

Interférométrie

- 1) Calcul de la différence de phase en fonction de l'altitude
- 2) Exemple de Cibles pouvant être des réflecteurs permanents
- 3) Visualisation de l'image des différences de phase
- 4) Incertitudes sur les mesures d'altitude et de déplacements
- 5) Valeur maximale de B perpendiculaire pour ne pas trop dégrader le facteur de cohérence
- 6) Propriétés générales du facteur de Cohérence