

---

# Bases physiques de la télédétection et sa problématique

## *Basic physical principles and problematical aspects of teledetection*

Professeur Francis Becker

Groupe de Recherches en Télédétection Radiométrique  
Université Louis Pasteur, Strasbourg

---

### Introduction

La télédétection électromagnétique, la seule dont il sera question ici, consiste à mesurer l'évolution au cours du temps des diverses caractéristiques du rayonnement électromagnétique émis par la planète, rayonnement qui contient, comme nous le verrons, des informations sur la surface, ou plus exactement sur l'interface sol-atmosphère et le sous-sol. Toute la difficulté de la télédétection consiste à enregistrer suffisamment de caractéristiques intéressantes du rayonnement pour en déduire les informations que l'on recherche. Pour ce faire, il faut avoir une idée de ce qui se passe.

Quelques exemples concernant les eaux de surface illustreront cet exposé. Une étude assez détaillée de ces problèmes est faite dans les divers rapports de l'OPIT sur l'état de l'art [1] et dans le "Manual of Remote Sensing" [2].

### Principes de base

#### Disposition générale d'une expérimentation en télédétection

La disposition d'une expérience en télédétection est schématisée sur la figure 1. Dans la période de recherche, une expérience de télédétection comprend trois phases :

- une phase d'acquisition des données souvent effectuée à trois niveaux et de façon synchrone (in-situ, à bord d'avion, à bord de satellite),
- une phase de traitement des données (analyse numérique, déconvolution, modélisation, classification, etc.),
- une phase de contrôle in-situ et de recherches de modèles in-situ (études de l'interaction du rayonnement électromagnétique et du milieu naturel).

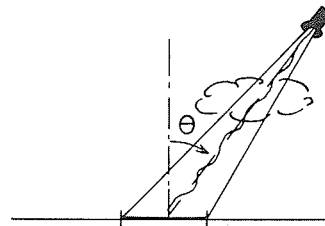


Figure 1 – Schéma de principe de la télédétection

Dans la période opérationnelle, il n'y a en principe plus qu'une phase : le traitement et l'analyse des données fournies périodiquement par les satellites. . . mais nous n'en sommes pas encore là pour beaucoup d'applications.

Les différences de principe essentielles entre télédétection active et passive se situent au niveau de l'acquisition des données :

- En télédétection active, la scène est irradiée par un émetteur. Un récepteur enregistre la luminance *rétro diffusée* par la scène (avec toutes les perturbations que nous discuterons plus loin).

Dans ce type de mesure, l'émission est la plupart du temps *cohérente*, ce qui est un gros avantage car il est alors possible de faire des corrélations entre émetteur et récepteur.

- En télédétection passive, les seules sources utilisées sont les sources naturelles (soleil, terre, atmosphère). Elles ont l'avantage d'être gratuites, mais l'inconvénient de ne pas être cohérentes. Le récepteur enregistre la réponse de la terre à cette excitation naturelle.

## Le véhicule de l'information

Le véhicule de l'information est le rayonnement électromagnétique. Il est caractérisé à chaque instant par sa direction de propagation, son intensité dans chaque bande spectrale, les diverses bandes spectrales utilisées (le visible, le proche infrarouge, l'infrarouge thermique et les hyper-fréquences), sa polarisation, sa phase (pour les mesures de cohérence).

Chacune de ces grandeurs apporte sa contribution particulière à la connaissance du milieu. Si les trois premières sont couramment mesurées en télédétection active et passive, seules les deux dernières ne sont utilisées, en majeure partie, que dans la télédétection active. On peut encore ajouter que dans les mesures actives où on est maître de l'intensité de la source, il est possible de faire de la spectroscopie très fine et de s'appuyer sur la cohérence du faisceau incident.

Pourquoi le rayonnement électromagnétique véhicule-t-il de l'information ?

D'une manière schématique, on peut dire que la terre est sollicitée par le flux de rayonnement électromagnétique provenant du soleil (télédétection passive) et en outre par le flux de l'émetteur (télédétection active).

Elle réagit à deux niveaux :

(i) en émettant ou réémettant des rayonnements électromagnétiques.

(ii) en modifiant constamment son profil vertical thermique et hydrique de façon à équilibrer les bilans d'énergie et de masse dans les échanges qui se produisent à l'interface sol-atmosphère.

Ainsi en mesurant la luminance de la surface de la terre dans les bandes visibles, infrarouge thermique et ce qu'on appelle les micro-ondes, on pourra atteindre ces diverses réponses. Cette luminance est essentiellement produite dans l'interface sol-atmosphère. Cet interface n'est malheureusement pas défini de façon intrinsèque, car en particulier son épaisseur,  $d$ , dépend de la longueur d'onde du rayonnement, de la nature de l'interface (rugosité, porosité, etc.), de son humidité, de la profondeur jusqu'à laquelle des échanges physico-chimiques entre la terre et l'atmosphère ont lieu.

Par exemple, pour l'eau, l'interface varie beaucoup en épaisseur avec la longueur d'onde ; dans le visible, l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (surtout dans le bleu), ce qui permet une analyse de la qualité des eaux ; dans l'infrarouge thermique (8-14  $\mu$ ), cette épaisseur n'est plus que de quelques microns, si bien que seule l'extrême surface est émettrice. Pour un sol, l'épaisseur de l'interface dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident et de son humidité. Elle est de l'ordre de 10 à 11/10 de la longueur d'onde, ce qui rend les hyperfréquences très attractives dans ces études. Pour un sol couvert de végétaux, la définition de l'interface est encore plus complexe.

A cause de l'épaisseur de l'interface, il y a en général une

— émission (ou réflexion) de surface qui fait intervenir la rugosité, la géométrie, l'orientation de la surface ;

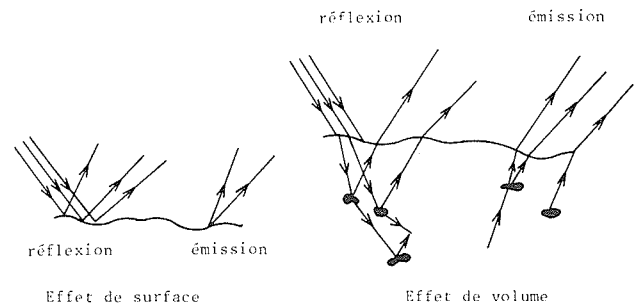


Figure 2 — Emission (réflexion) de surface et de volume

— émission (ou réflexion) de volume qui fait intervenir les propriétés internes de l'interface (profil hydrique, profil thermique, structure interne).

Ces deux mécanismes sont schématisés sur la figure 2.

De même, la dimension du pixel conduit à la mesure d'un flux moyenné sur des surfaces qui peuvent être importantes (voir plus loin : Effets d'échelle), ce qui amène à définir des paramètres moyens ou effectifs dont la définition n'est pas sans poser de problèmes [cf. réf. 4].

Dans ces conditions, on peut montrer que la luminance de l'interface est donnée par la relation (1)

$$\begin{aligned}
 R_{\lambda,p}(\theta, \phi; \theta_s, \phi_s, T) = & \underbrace{\epsilon_{\lambda,p}(\theta, \phi) R_s^o(T)}_{\textcircled{1}} + \\
 & + \underbrace{\rho_{\lambda,p}(\theta, \phi; \theta_s, \phi_s) R_{\lambda}^{\text{soleil}} \cos \theta_s d\Omega_s}_{\textcircled{2}} \dots \\
 & + \underbrace{\int \int \rho_{\lambda,p}(\theta, \phi; \theta_a, \phi_a) R_{\lambda}^{\text{vis}}(\cos \theta_a d\Omega_a)}_{\textcircled{2}} + \\
 & \dots + \underbrace{\int \int_{\text{hemis}} \rho_{\lambda,p}(\theta, \phi; \theta_a, \phi_a) R^{\text{atm.}}(\theta_a, \phi_a, T_a) \cos \theta_a d\Omega_a}_{\textcircled{3}} + \\
 & + \underbrace{\text{réflexion éventuelle des sources artificielles}}_{\textcircled{4}} + \textcircled{5} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Les divers termes apparaissant dans l'expression (1) ont la signification suivante :

(i) Le terme  $\textcircled{1}$  décrit le flux directement émis par l'interface. Il est caractérisé par la luminance spectrale du corps noir à la température effective de surface  $T$ . Il dépend de l'émissivité spectrale directionnelle effective  $\epsilon_{\lambda,p}(\theta, \phi)$  pour une polarisation donnée et de la température effective de surface  $T$ .

(ii) Le terme  $\textcircled{2}$  décrit le flux provenant du rayonnement solaire direct au niveau de l'interface et du rayonnement solaire diffus. Il est évidemment caractérisé par la luminance du soleil au niveau de l'interface  $R_{\lambda}^{\text{sol}}$ , par l'angle solide  $d\Omega_s$  sous lequel on peut

voir le soleil et l'inclinaison du soleil. Il dépend de la réflectivité spectrale bidirectionnelle  $\rho_{\lambda,p}(\theta, \phi; \theta_s, \phi_s)$ , de la direction de visée  $(\theta, \phi)$ , et de la direction du soleil  $(\theta_s, \phi_s)$  mesurées par rapport à la verticale locale. La pente du terrain jouera donc un rôle à ce niveau ainsi que l'heure à laquelle est faite la mesure. Il dépend aussi du flux diffus, c'est-à-dire de la composition de l'atmosphère en molécules et en aérosols.

(iii) Le terme ③ décrit le flux provenant de l'atmosphère et réfléchi par la scène. Ce flux est essentiellement dû à l'émission propre de l'atmosphère. Il est caractérisé par la luminance spectrale directionnelle de l'atmosphère  $R_{\lambda}^{at}(\theta_a, \phi_a; T_a)$  qui dépend des profils de température et d'humidité de l'atmosphère, de sa composition en aérosols, de sa nébulosité, etc.

(iv) Le terme ④ décrit le flux rétrodiffusé à partir d'une source artificielle. Il est caractérisé par les propriétés de l'émetteur. Il dépend de la section efficace de rétrodiffusion, de la densité de matière diffusante.

Il faudrait ajouter encore un terme ⑤ traduisant les effets de l'environnement rendus possibles par la diffusion atmosphérique.

Ces différentes contributions sont plus ou moins importantes suivant le domaine spectral. Le terme ① est prédominant dans les bandes infrarouge thermiques. Il est négligeable par rapport au terme ② jusqu'à  $2,5 \mu$ , domaine dans lequel ② est prédominant. Entre 3 et  $5 \mu$ , les termes ①, ② et ③ peuvent être du même ordre... comme dans le domaine des hyperfréquences. Si la source de l'émetteur est très intense en radiométrie active on peut quelquefois négliger les termes ①, ② et ③ devant ④.

L'émission et la réflexion font donc intervenir plusieurs paramètres physiques (émissivité et réflectivité) caractéristiques du milieu et de son état *hydrique* et *thermique* (de plus la température apparaît explicitement). C'est par ces facteurs que le rayonnement électromagnétique émis a, en quelque sorte, la mémoire des propriétés de l'interface et du sol. De façon plus précise, en effet, on sait que :

1) L'émissivité spectrale et la réflectivité spectrale dépendent de nombreux paramètres thématiques caractérisant l'interface. Entre autres, on peut citer sa forme, sa structure, sa rugosité, sa nature, sa composition, son profil hydrique et son profil thermique.

Cette dépendance est observée expérimentalement et décrite par des modèles théoriques ou pragmatiques [7]. Dans le domaine de l'eau, on peut citer par exemple, les travaux de l'équipe de R.D. Jackson [8] concernant l'influence de l'humidité de surface sur la réflectivité et l'albedo dans le visible et ceux de Fuchs and Tanner [9] concernant l'influence de l'humidité sur l'émissivité. La figure 3 montre ces dépendances. D'autres exemples seront donnés au cours de ces journées dans les divers domaines de longueur d'onde.

2) La température effective de surface traduit l'équilibre obtenu à un instant donné entre les divers flux

d'énergie et de masse à travers l'interface. Sans entrer dans le détail, les flux intéressants sont :

(i) Le flux thermique provenant du sol,  $G$ , Il dépend de la conductibilité thermique, laquelle dépend de l'humidité (cf. Fig. 3).

(ii) Les flux de masse,  $E$  et d'énergie,  $LE$  (chaleur latente) et  $H$  (chaleur sensible). Ils dépendent des paramètres microclimatiques au niveau de l'interface (vent, profil de température et d'humidité) et des paramètres décrivant le transfert (résistances diverses liées à la rugosité, diffusion, etc.).

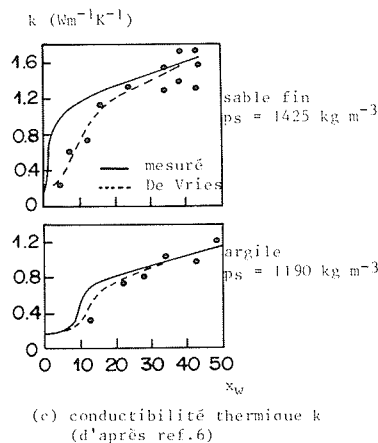
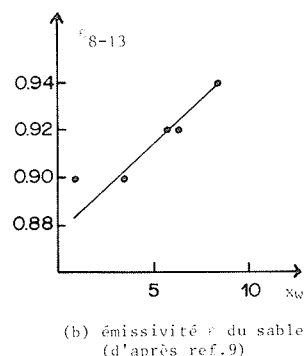
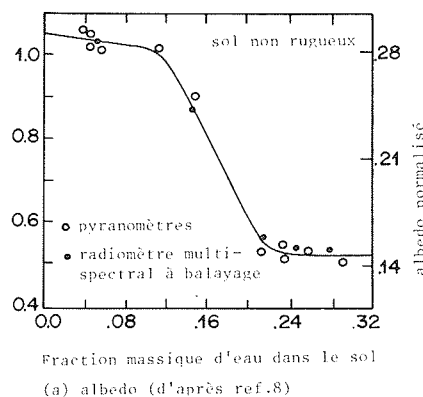


Figure 3 -- Dépendance de la réflectivité, l'émissivité et la conductibilité en fonction de la fraction volumique d'eau  $x_w$

Tableau 1 : Les divers paramètres intervenant en télédétection		
$I_{\theta, \xi}(\Delta\lambda, \theta, \varphi, t, h, dS)$ Signal de sortie		
<p><i>paramètres logistiques</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- heure <math>t</math></li> <li>- saison</li> <li>- axes de prise de vue (orbite)</li> <li>- etc.</li> </ul>	$\left. \begin{matrix} h \\ \theta \\ \varphi \end{matrix} \right\}$	<p><i>paramètres instrumentaux</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- bandes spectrales <math>(\lambda, \Delta\lambda)</math></li> <li>- polarisation <math>p</math></li> <li>- réponse spectrale <math>f_{\omega}(\lambda)</math></li> <li>- IFOV (<math>\rightarrow dS</math>)</li> <li>- <math>\tau</math></li> </ul>
<p><i>atmosphère</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- composition moléculaire</li> <li>- profil P.T.U.</li> <li>- distribution et composition des aérosols</li> </ul>		<p><i>Météorologie</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- position du soleil</li> <li>- couverture nuageuse</li> <li>- température des nuages</li> <li>- pluie</li> <li>- turbulence</li> </ul>
<p><i>paramètres microclimatiques</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>T_a, T_c</math> - température air et sol</li> <li>- <math>e_a</math>, pression de vapeur de l'air</li> <li>- <math>e_c</math>, pression de vapeur saturante à <math>T_c</math></li> <li>- <math>U_a</math>, vitesse du vent</li> <li>- <math>Z_o</math>, rugosité aérodynamique</li> </ul>	<p><i>paramètres physiques</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>optiques</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- émissivité <math>\epsilon_{\lambda}</math></li> <li>- réflectivité <math>\rho_{\lambda}</math></li> </ul> </li> <li>• <i>thermiques</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- chaleur spécifique <math>\rho c_p</math></li> <li>- résistance <math>\left\{ \begin{matrix} r_a \\ r_c \end{matrix} \right.</math></li> </ul> </li> <li>• <i>géomorphologiques</i> (pente) <math>\left\{ \begin{matrix} H_a \\ r_c \end{matrix} \right.</math></li> </ul>	<p><i>paramètres thématiques</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nature du couvert</li> <li>- état phénologique</li> <li>- indice foliaire</li> <li>- contraintes diverses</li> <li>- rugosité du sol</li> <li>- profil thermique</li> <li>- profils d'humidité</li> <li>- distribution des feuilles</li> </ul>
		<p><i>Interface</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• couplage sol-atmosphère</li> <li>• Lieu des bilans                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'énergie</li> <li>- de masse</li> </ul> </li> <li>• Lieu d'émission du signal télédétection</li> </ul>
<p><i>paramètres thématiques</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nature du sol</li> <li>- dimension</li> <li>- humidité</li> <li>- salinité</li> <li>- composition minérale</li> <li>- structures</li> <li>- failles</li> </ul>	<p><i>humidité de surface</i></p> $\left\{ \begin{matrix} \text{Modèles} \\ \text{in situ} \end{matrix} \right\}$	<p><i>température TS</i></p> <p><i>paramètres physiques</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>thermiques</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- conductibilité <math>k</math></li> <li>- chaleur spécifique <math>\rho c_p</math></li> </ul> </li> <li>• <i>hydriques</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- conductibilité <math>\left\{ \begin{matrix} k_{\psi} \\ k_T \end{matrix} \right.</math></li> <li>- capacité hydrique <math>c_h</math></li> </ul> </li> <li>• <i>électromagnétiques</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante diélectrique <math>\epsilon' - j\epsilon''</math></li> <li>- conductibilité <math>\sigma</math></li> </ul> </li> </ul>
		<p><i>Sol</i> <i>Sous-Sol</i></p> <p>essentiellement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* conduction thermique</li> <li>* transferts hydriques</li> </ul>

(iii) Le flux radiatif net  $R_n$ . Il est gouverné par les albedos de l'interface qui dépendent fortement de l'humidité [cf. ref. 8] mais aussi de l'heure de la journée [cf. ref. 6]. Cet albedo dépend aussi évidemment de la structure superficielle, de la nature de la surface, etc.

La conservation de l'énergie impose que

$$G + R_n + LE + H = 0$$

Cette équation transcrit un des couplages entre les effets radiatifs thermiques et hydriques. Il existe plusieurs modèles prenant en compte ces divers facteurs [cf. par exemple les ref. 6, 10, 11, 12, 17 et la discussion comparative dans la ref. 5]. La majeure partie des paramètres intervenant est regroupée dans le tableau 1.

L'étude dynamique de la variation de la température de surface est donc très intéressante car elle ren-

seigne non seulement sur les effets de surface, mais aussi sur les effets dûs au proche sous-sol. Cette étude accroît considérablement les potentialités de la télé-détection. Une difficulté apparaît néanmoins, à cause des effets d'échelle discutés plus loin et de l'épaisseur de l'interface, le sens de cette température effective de surface ainsi définie n'est pas sans poser de sérieux problèmes d'interprétation [6].

## Conclusion

La luminance émise par la scène dépend de facteurs très intéressants pour ceux qui s'intéressent aux problèmes de l'eau : l'humidité et la température. Mais elle n'est pas *directement* liée à ces facteurs. Elle dépend de paramètres de structures, de paramètres décrivant les échanges physico-chimiques et des paramètres micro-météorologiques variables dans l'espace et le temps. Il apparaît donc nécessaire à ce niveau de mesurer la luminance de la scène *à la fois* :

- dans les bandes visibles (flux réfléchi qui donne une indication sur l'albedo et le flux radiatif entrant)
- dans les bandes infrarouge thermique (flux directement émis qui donne une indication sur l'émissivité et le profil thermique)
- dans les bandes hyper-fréquence (flux directement émis en passif ou réfléchi en actif qui permet d'atteindre les constantes diélectriques très dépendantes de l'humidité).

A l'heure actuelle ces mesures doivent encore être complétées par des mesures locales pour obtenir les paramètres de caler les modèles théoriques. Peut-on espérer qu'il ne deviendra plus nécessaire de faire ces mesures au sol ? ... Avant de répondre, analysons brièvement à quoi correspond le signal enregistré et quelles sont les sources d'erreur.

## Le signal enregistré — Les perturbations

Les conclusions que nous venons d'indiquer s'appuient sur la connaissance de la luminance locale au niveau du sol... mais ce n'est malheureusement pas celle qui est mesurée à partir de satellites ou mêmes d'une plateforme aérienne. Dans cette section nous allons indiquer la relation entre la luminance émise par la scène (relation 1) et le signal enregistré. Il y a deux types d'effets à prendre en compte.

### Effets perturbateurs dûs au radiomètre et à l'atmosphère

Le rayonnement émis par la scène est perturbé par l'atmosphère et modifié par le radiomètre lui-même. Si on appelle  $f_{\omega}(\lambda)$  la réponse spectrale du radiomètre (où  $\omega$  définit l'angle solide d'analyse), le signal enregistré s'écrit :

$$I_{\lambda,p}(\Delta\lambda, \theta, \phi, t, h, d_s) = I_0 + \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} f_{\omega}(\lambda) \underbrace{[t_{\lambda}(h, \theta) R_{\lambda,p}(\theta, \phi, T_s)]}_{\text{① atténuation}} + \underbrace{R_{\lambda}^{\text{atm}}(\theta, \phi, T_a)}_{\text{② émission propre}} d\lambda \quad (2)$$

où

$\Delta\lambda$  est la largeur de bande définie par le radiomètre  
 $\theta, \phi$  la direction d'observation

$h$  l'altitude d'observation

$d_s$  la dimension du pixel

$\lambda$  la position moyenne de la bande spectrale

$p$  la polarisation.

L'intégrale sur la longueur d'onde traduit la modification produite par le radiomètre. Pour analyser les données il faut donc :

(i) Faire une déconvolution du signal c'est-à-dire extraire la partie entre crochets dans l'expression ②.

Cette opération nécessite une bonne connaissance de  $f_{\omega}(\lambda)$ , ce qui ne peut se faire que par une calibration du radiomètre. Cette déconvolution comprend aussi les corrections géométriques dues aux variations d'attitude du porteur au cours de l'acquisition des données.

(ii) Faire les corrections atmosphériques, c'est-à-dire extraire  $R_{\lambda,p}$  de l'expression entre crochets. Comme on le voit, l'atmosphère perturbe de deux façons :

1) Elle atténue le rayonnement émis par le facteur d'atténuation  $t_{\lambda}(h, \theta)$  (terme 1).

2) Elle émet un rayonnement parasite (terme 2)

Ces effets dépendent des paramètres atmosphériques (composition moléculaire, profil thermique, composition en aérosols, etc.). Parmi ces paramètres, certains sont *très fortement variables* et doivent être mesurés en principe, tels le profil thermique et le profil d'humidité obtenus par un sondage P.T.U. En fait, il est possible d'élaborer des méthodes de mesure qui évitent ces sondages en utilisant la radiométrie différentielle [13].

Ces effets perturbateurs peuvent être très importants et doivent être pris au sérieux. Dans les bandes visibles, surtout dans le bleu et dans toutes les bandes spectrales, sauf les hyper-fréquences, si l'atmosphère est trop nébuleuse, pas assez claire, les effets recherchés peuvent être complètement masqués. Dans les bandes infra-rouge thermique les erreurs peuvent atteindre plusieurs degrés. Il faut donc absolument les corriger pour avoir des mesures absolues, mais surtout pour avoir des *mesures comparables* d'un point à un autre du globe et d'un instant à un autre.

De fait, il existe de nombreux programmes de correction [13-14] mais ils sont souvent lents. Il faut donc élaborer des méthodes approximatives traduisant les effets essentiels tout en conduisant à des modèles suffisamment simples pour être traités en ligne. Par exemple,

un tel modèle a été élaboré dans une collaboration GTS-LMD [13] pour des atmosphères claires en infra-rouge thermique. Sa simplicité a permis de produire des images corrigées d'atmosphère [15] donnant la température absolue à  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ .

Les effets perturbateurs de l'atmosphère sont un gros handicap pour la télédétection dans les domaines visible et infra-rouge thermique. Ils sont moins sérieux dans les bandes hyper-fréquences qui ont été appelées pour cette raison, de façon peut-être abusive, bandes "tous temps".

Tous ces paramètres perturbateurs sont aussi regroupés dans le tableau 1.

### Effets d'échelle

La dimension de la tache d'analyse sur le sol varie très fortement avec la longueur d'onde et l'altitude de la prise de vue. Elle peut aller de quelques  $\text{m}^2$  à plusieurs  $\text{km}^2$ . Par exemple, le diamètre du pixel au nadir est pour Landsat 2 de 80 m, pour Spot de 10 m, pour HCMM de 500 m, etc.

La luminance mesurée à partir d'avion ou satellite provient donc d'une surface bien plus grande que celle correspondant aux mesures in-situ. Se pose alors le problème de la corrélation entre les mesures faites par télédétection et les mesures in-situ.

Les satellites vont donner des *effets moyens* qu'il faut modéliser par des paramètres *macroscopiques effectifs*. Ces paramètres ne seront définis que par les moyennes réalisées à partir de modèles adéquats et ne seront pas mesurables in-situ, sauf si les surfaces sont très homogènes (aussi bien en température qu'en nature, structures, . . .) ce qui est souvent le cas pour les grandes étendues d'eau qui peuvent servir de zone de calibration.

Ceci montre qu'il ne faut pas nécessairement modéliser en détail toutes les fluctuations locales. . . seules les moyennes seront observables.

Ainsi, dans le domaine hydrique, les satellites permettent de faire des bilans à l'échelle d'un bassin ou d'une région et de comparer région par région ces bilans. L'avion permettra l'analyse au niveau des parcelles. Il y a là une complémentarité très intéressante exploitée dans la plupart des expériences de télédétection.

### Problématique et méthode d'analyse

L'expression (2) et le tableau 1 résument toute la difficulté de l'interprétation des données de télédétection : beaucoup de paramètres entrant en jeu (tous les paramètres thématiques) et relativement peu de paramètres mesurés (les signaux  $I_{\lambda, p}$ ). Pour extraire des mesures faites par télédétection les informations intéressantes, il faut en principe résoudre les problèmes qui viennent d'être évoqués. . . et quelques autres, mais pour certaines applications qui seront discutées plus loin, il ne sera pas toujours nécessaire de le faire.

Pour résoudre ces problèmes, il y a deux types d'approche complémentaire :

(i) Une approche pragmatique, c'est-à-dire qui étudie systématiquement les dépendances des paramètres physiques en fonction des paramètres thématiques. Elle est très utile car suscite des relations et met au jour des phénomènes nouveaux. Cette approche doit être complétée par une analyse plus théorique qui permet de donner un sens aux paramètres empiriques introduits dans cette approche et surtout de voir quel est la généralité de ces paramètres.

(ii) Une approche plus théorique qui, partant de modèles descriptifs assez complets, permet de "démontrer" les relations empiriques découvertes par l'approche pragmatique en leur donnant un sens, et de mettre aussi en évidence des relations simples par une recherche systématique des phénomènes dominants.

De toute façon, quelle que soit l'approche, se pose le problème théorique de l'inversion des données, c'est-à-dire à partir d'une variation observée d'un paramètre physique en déduire les variations des divers paramètres thématiques qui l'ont produite. . .

Le degré de complexité de l'interprétation dépend du problème à résoudre. Les quelques exemples qui suivent en sont des illustrations.

### Eaux de surface

#### 1) Cartographie, forme, etc. . .

Les problèmes évoqués n'ont pas besoin d'être résolus, sauf les problèmes de *correction géométrique* pour la restitution sur carte.

#### 2) Etudes thermiques, pollution thermique, dynamique fluviale, etc.

Ce domaine est un domaine privilégié pour la télédétection infra-rouge et le plus accessible. Il y a deux aspects :

##### (i) Aspect thermique

Pour produire les isothermes de *surface*, il faut connaître l'émissivité de l'eau et faire les corrections atmosphériques. On peut envisager une mesure "en ligne" d'émissivité par mesures corrélées actif-passif. Beaucoup d'études opérationnelles ont été faites dans ce domaine, certaines seront présentées à ces Journées.

##### (ii) Aspect dynamique fluviale

Si on suppose que la température est un bon traceur des courants, on peut espérer atteindre la dynamique fluviale par thermographie. Il faut ici, en plus des deux problèmes évoqués au paragraphe précédent, un modèle thermodynamique reliant la température de surface à une concentration ou à un niveau de mélange. De tels modèles existent [cf. par exemple la réf. 12]. De nombreuses études ont été réalisées dans ce domaine et certaines seront présentées à ces Journées [cf. aussi par exemple la réf. 16].

#### 3) Etudes de qualité des eaux

Il faut utiliser ici des bandes spectrales qui pénètrent dans l'eau. En plus des bandes thermiques, il faudra donc utiliser les bandes visibles à courte longueur d'onde. De plus, la télédétection active est particulièrement appropriée à ce genre d'analyse, en particulier la spectrométrie

Raman. Pour interpréter correctement ces données, il faut un modèle de réflectance en plus des modèles de correction atmosphérique. On trouvera dans les références 1 et 2 des exemples de ce type d'analyse ; d'autres seront aussi donnés au cours de ces Journées.

### Neiges et glaces

En plus des bandes optique et infra-rouge thermique, les bandes hyper-fréquence sont d'une grande utilité car la constante diélectrique est liée à la teneur en eau et à l'âge des glaces. On trouvera des exemples dans les références 1 et 2.

### Humidité des sols — Eaux souterraines — Evaporation

C'est la partie la plus complexe qui nécessite la résolution de presque tous les problèmes évoqués dans cet exposé et synthétisés dans le tableau 1.

Ici encore, il y a deux manières complémentaires d'aborder cette étude :

(i) Approche s'appuyant sur les propriétés optiques de l'interface dans le visible et (ou) les hyper-fréquences (mesure du flux réfléchi visible ou H.F.). Cette méthode utilise la dépendance de la réflectivité ou de l'albedo en fonction de l'humidité (cf. Fig. 3 par exemple). Il y a en effet une relation entre le flux réémis par la terre et l'humidité du sol... (mais cette relation dépend aussi d'autres facteurs). Dans les hyper-fréquences passives, la constante diélectrique est plus directement liée à l'humidité... mais le flux émis dépend aussi du profil thermique, ce qui n'est pas le cas des mesures actives qui sont très intéressantes dans ce domaine.

(ii) Approche s'appuyant sur l'analyse des flux d'énergie et de masse à travers l'interface (mesure du flux thermique).

Cette méthode utilise la variation de la température de surface au cours du temps comme indicateur des variations au cours du temps du niveau des échanges d'énergie et de masse, et donc de l'humidité du sol, à la suite de la variation du flux solaire. Ceci est possible grâce aux modèles in-situ reliant la variation de cette température aux flux précédents [cf. ref. 6,17].

En fait, comme nous le suggérons plus haut, ces deux approches sont couplées et doivent être menées simultanément. Il faut faire des mesures simultanées du flux réfléchi dans le visible et du flux thermique dans l'infra-rouge. Les satellites permettant ces deux mesures de façon très répétitive (toutes les heures par exemple) sont très intéressants. C'est le cas de Météosat, satellite géostationnaire récemment lancé par l'ESA. L'analyse récemment présentée par Favard [18] des données de SMS est très intéressante sous cet aspect.

### Conclusions

Quels que soient le problème étudié et le type d'approche utilisé, nous avons montré qu'il fallait prendre en considération un nombre de paramètres suffisant

pour donner une description réaliste des phénomènes observés, faute de quoi de sérieuses erreurs d'interprétation pouvaient être commises, comme l'a montré par exemple A. Perrier [17] dans la relation entre évapotranspiration et rayonnement net.

De même, si on néglige les effets atmosphériques on peut commettre des erreurs de plusieurs degrés, ou encore si on ne tient pas compte de la dépendance angulaire des réflectivités bidirectionnelles, on peut faire des erreurs de classification, etc.

Ceci dit, nous avons aussi montré comment les différents modèles élaborés permettaient de progresser dans la prise en compte de tous les paramètres recensés et donc de progresser dans la solution des problèmes évoqués, voire d'atteindre dans certains secteurs une exploitation quasi-opérationnelle de la télédétection. Les différents exposés présentés à ces Journées en donneront aussi une illustration.

Il est non moins important de ne pas attendre que tous les problèmes que j'ai évoqués soient résolus pour acquérir une pratique en télédétection. Cette pratique contribue elle aussi de façon efficace à la maîtrise de l'outil, ce qui permettra de concrétiser ses potentialités, telles la possibilité de réaliser des mesures synoptiques, instantanées, à grande répétitivité sur des dimensions très étendues.

### Bibliographie

- [1] BECKER F., BERROIR A., DESCHAMPSP.Y., GIGNEROT B., GERVAIS DE LAFOND Y., GUYOT G., TABBAGH A. et VIEILLEFOSSE M. — *"Etat de l'art en télédétection"*, Paris, OPIT, 1977, 4 volumes. 1<sup>ère</sup> partie - chapitre I : *La saisie des données, les principes physiques et la problématique de leur interprétation*.  
DE MONTRICHER G., DUVERNOY J. et GIGNEROT B. — 1<sup>ère</sup> partie - chapitre 2 : *Les traitements en télédétection*, 121 p. multigr.  
BIED-CHARRETON M. (Coordination). — 2<sup>e</sup> partie - chapitre 1 : *Télédétection et aménagement*, 214 p. multigr.  
VALERIO Cl. et VUILLAUME Y. — 2<sup>e</sup> partie - chapitre 2 : *Ressources en eau et télédétection*, 156 p. multigr.
- [2] REEVES R.G. — *Manual of Remote Sensing*, tomes 1 et 2. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia (1975).
- [3] *Multispectral scanning systems and their potential application to earth resources surveys*  
a) HINGHAM A.D., WILKINSON B. and KAHN D. (1973). — ESRO (ESA) n° CR 231 Basic Physics and Technology.  
b) FITZGERALD E. (1974). — ESRO (ESA) n° CR 232 Spectral properties of materials  
c) HINGHAM A.D. et al. (1974). — ESRO (ESA) n° 236 Summary volume  
\* *Remote sensing for Environmental Sciences*, edited by E. Schanda, Springer Verlag (1976)  
\* *Passive microwave radiometry and its potential applications to earth resources surveys*.  
a) AXELSON S. and EDVARDSSON O. (1973). — ESRO (ESA) n° CR 71 Basic Physics and Technology  
b) ORHANG T. (1973). — ESRO (ESA) n° CR 74 Microwave emissions from natural materials  
c) HOPPE G. et al. (1972). — ESRO (ESA) n° CR 75 Applications.  
d) OHLSSON E. (1972). — ESRO (ESA) n° CR 116 Summary report

- [4] BECKER F. – Problématique de la télédétection électromagnétique et principes d'interprétation. Comptes-rendus de la Conférence OST, Toulouse B1 (1978).
- [5] BECKER F. – Thermal infrared remote sensing, principles and applications. ISpra Course RS/A-B/77/61 (1977) et à paraître (1978).
- [6] ROSEMA A. – *Simulation of the thermal behaviour of bare soils for remote sensing purpose. Heat and Mass transfer in the biosphere*. Part, 1, ed. by De Vries and Afgan, p. 109, Scripta Book, Washington D.C. (1975).
- ROSEMA A. – A mathematical model for simulation of the thermal behaviour of bare soils based on heat and moisture transfer. *Niwars publication*, n° 11, p. 92 (1975).
- ROSEMA A. – Tell us program. E.A.R.S. bv (Dec. 1977).
- SOER G.J.R. – The Tergra model - A mathematical model for the simulation of the daily behaviour of crop temperature and actual evapotranspiration, Nota 1014, Wageningen and Niwars 46 (Nov. 1977).
- [7] Il est difficile de donner une littérature exhaustive. On trouvera dans les références 1 à 5 une bibliographie assez complète. Parmi les travaux les plus récents (non déjà cités) on peut noter :
- dans le visible : BONHOMME R., GUYOT G. et RIOM J. – Relation existant entre la réflectance d'un couvert végétal et sa structure, la hauteur du soleil et l'angle de visée - perspective de modélisation. Comptes-rendus de la Conférence OST, Toulouse B-5 (1978).
  - Dans les hyper-fréquences : MEYLAN P., MUSY A., MORZIER C., WYSSSEN D. et HOFER R. – Etude de la variation spatiotemporelle de l'humidité du sol par télédétection. Comptes-rendus de la Conférence OST, Toulouse B-3 (1978).
- [8] REGINATO R.J., VEDDER J.F., ISDO S.B., JACKSON R.D., BLANCHARD M.B. et GOETTELMAN R. – An evaluation of total solar reflectance and spectral band ratioing techniques for estimating soil water content. *J. of Geophys. Res.* 82, p. 2101 (1977) (many ref. can be found in this paper).
- [9] FUCHS M. and TANNER C.B. – Infra-red thermometry of vegetation. *Agronomy Journal* 58, p. 597 (1966).
- FUCHS M. and TANNER C.B. – Surface temperature measurements of bare soils. *J. Appl. Meteo* 7, p. 303 (1968)
- [10] TABBACH A. – Sur la détermination du moment favorable de l'interprétation des résultats en prospection thermique archéologique. *Ann. Géophys.* 32, 1977 et thèse (Paris, 1977).
- [11] KAHLE A.B. – A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing. *J. of Geoph. Res.* 92, 1673 (1977).
- [12] DINELLI G. and MAINI M. – Remote sensing of thermal alteration and circulation patterns of riverine and coastal effluents. IFAC Symposium on environmental system planning, Kyoto (1977).
- [13] BECKER F., IMBAULT D. et PONTIER L. – See surface temperature and atmospheric transmission : measurements by differential radiometry. Proceedings of the first general assembly of EARSEL, Strasbourg, 1977 p. 93.
- BECKER F. – Température superficielle de la mer et la transmission atmosphérique par radiométrie différentielle. Compte-rendu des journées CNES-CNEXO, Brest, 1978.
- IMBAULT D., SCOTT N. et CHEDIN A. – Détermination de la température de la mer à partir de mesures radiométriques dans deux fenêtres atmosphériques. Comptes-rendus de la conférence OST, Toulouse B-6 (1978).
- [14] *The influence of the atmosphere on remote sensing measurements.*
- a) FARROW J.B. (1975)
  - ESRO (ESA) n° CR 353 Summary report.
  - b) FARROW J.B. (1975)
  - ESRO (ESA) n° CR 355 Microwave and radiowaves.
  - KUNKLE B., WOLZ F., BOLLE H.J. et REDEMAN E. – Air quality measurements from space platforms. Rapport ESA CR 577 (1975).
  - Mc CLATCHEY R.A. et al – Optical properties of the atmosphere, AFCRL 72, 0497
  - SELBY, Mc CLATCHEY. – Atmosphere transmittance from 0,25 to 28,5  $\mu$  : computer code LOWTRAN. AFGL, Techn. Rept. 75, 0255 (1975).
  - Supplément LOWTRAN 3 B (1976). AFGL, Techn. Rept. 76, 0258.
  - CHEDIN A., SCOTT N. and HUSSON N. – Opération, gestion et étude des informations spectroscopiques atmosphériques. (GEISA) LMD.
  - SCOTT N. – A direct method of computation of the transmission function of an inhomogeneous gaseous medium. Description of the method. *Journ. of Quantitative Spectrosc. and Radiat. Trans.* 14 (1974) 691.
  - DESCHAMPS Ph. – Télédétection de la surface de la mer par radiométrie infrarouge. Thèse de doctorat (Lille 1977).
- [15] BECKER F., BLUMENROEDER D., DECHAMBENOY C., HECHINGER E., HOURANI A., PELLEGRIN A., RAMEY B. et TRAUTMANN J. – Thermographie de la surface du Rhin par télédétection radiométrique infrarouge. Rapport GTS (1978) et publication en cours.
- [16] BECKER F. and SIROU F. – Mesure et contrôle par télédétection d'une pollution provoquée par le rejet en mer d'un effluent chaud dans la région d'Arcachon. *Oceanexpo*, vol. 3 (1974).
- [17] PERRIER A. – Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux. (Thèse Paris VI, 1976).
- [18] FAVARD J.C. – Détermination de cycles thermiques à partir de satellites météorologiques géostationnaires. Comptes-rendus Conférence OST, Toulouse 1-16 (1978).



## Discussion

Président : M. J.M. de LAMARE

*Le Président.* — Je remercie M. BECKER. En très peu de temps vous avez très bien résumé et montré toute la complexité des aspects physiques de ce sujet. La fin de votre exposé me paraît particulièrement importante. Elle montre, en effet, qu'il n'est pas toujours nécessaire d'avoir résolu les problèmes physiques et déterminé tous les paramètres pour obtenir des résultats, lorsqu'on traite certains phénomènes simples. Je crois que certains des prochains exposés illustreront bien ce propos.

*M. RODIER.* — Pensez-vous que le contrôle au sol puisse être complètement supprimé dans certains cas ?

*M. BECKER.* — Non, je ne pense pas, surtout si ce contrôle au sol existe déjà. Le contrôle est toujours intéressant pour vérifier les résultats des modèles d'inversion et dans certains cas pour donner la valeur des constantes apparaissant dans ces modèles. Il faut néanmoins faire attention au facteur d'échelle apparaissant dans la comparaison des mesures faites au sol et à bord d'avion ou de satellite.

*M. VIDAL-MADJAR.* — Pourriez-vous apporter quelques précisions concernant les radars hyperfréquences.

*M. BECKER.* — Les radars intéressants en télédétection sont les scatteromètres qui permettent la mesure du coefficient de rétrodiffusion et les radars à ouverture synthétique qui permettent d'avoir d'excellentes résolutions géométriques au sol (20 ou 25 m à partir de satellite).

Ces mesures présentent de nombreux avantages, les plus intéressants permettant :

- de faire des mesures "tout temps" (ce qui n'est pas le cas en visible et infrarouge thermique),
- d'atteindre, en principe, la constante diélectrique du milieu très sensible à l'humidité, en fait une sorte de convolution entre rugosité de surface et constante diélectrique effective,
- d'utiliser la *cohérence* du faisceau qui permet des analyses fines de structure,
- de faire des analyses spectrales assez fines,
- d'utiliser les diverses polarisations des faisceaux incidents et réfléchis.

## Abstract

### Basic physical principles and problematical aspects of teledetection

The physical principles of teledetection and their application to various fields related to surface water and moisture are discussed. In the first part of the report, the general principle of active and passive teledetection is described, with emphasis on the various electromagnetic radiation quantities requiring measurement.

It is then explained why electromagnetic radiation conveys interesting information regarding the ground surface and immediate subsoil. The reason is stated to be that surface luminance as given by expression (1) depends explicitly on the optical parameters of the interface (directional spectral emissivity and bidirectional spectral reflectivity), and also on surface temperature. It is shown how these parameters depend on the properties and humidity of the medium (Fig. 3).

The importance of dynamic study of surface temperature (i.e. Earth's response to solar excitation and a measure of the energy balance at ground level) is also demonstrated.

The main parameters to be considered are summarised in Table 1, which shows one of the difficulties of teledetection, i.e. that many parameters have to be taken into account but few are measured ( $I_{\lambda p}$  output signals).

This unfortunately is not the only difficulty. It is shown how both atmospheric effects and the radiometer itself interfere with surface luminance emission (expression (2)). Corrective methods whereby the data are reversed are described.

A passing reference is made to the inherent difficulty of the considered measurement method, resulting from the difference between the measurement scales at ground level and from the satellite, which is amplified by the difference between the respective scanning areas.

It is shown by examples that not all the problems referred to need necessarily be solved for effective use of teledetection methods.