

## TRAITEMENT D'ANTENNE ET RESEAUX MAGNETIQUES

Bruno FLAMENT, Roland BLANPAIN

CEA-DTA-LETI - Département Systèmes - SETIA, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble  
CENG BP 85 X 38041 Grenoble Cedex

### RÉSUMÉ

Le but de notre démarche est d'effectuer une analyse puis une séparation des signaux illuminant une antenne de capteurs magnétiques. Notre modèle est constitué de la somme des bruits géomagnétiques et d'un signal utile inconnu. En nous servant des propriétés des bruits géomagnétiques, nous montrons que le traitement d'antenne s'adapte bien au problème de séparation. Une application sur réseau à 5 capteurs illustre le fonctionnement de la méthode dans un cas simple.

### 1. Introduction

L'étude de phénomènes modifiant les propriétés magnétiques de l'environnement est rendue possible grâce aux magnétomètres à haute sensibilité. Outre la mesure du phénomène utile dont l'observateur espère tirer un gain de connaissances, les capteurs mesurent un catalogue entier de phénomènes annexes en intérêt, mais dont la puissance vient perturber fortement le signal utile. Un prétraitement est alors nécessaire à toute interprétation. Nous désirons ici tirer parti des connaissances que nous pouvons avoir sur les signaux captés par l'antenne. Il nous faut donc les détailler.

#### 1.1. Le signal utile

On considère ici le cas où le *signal utile* est créé par une anomalie magnétique locale du milieu, lentement variable avec le temps (bande ULF de 0 à 5Hz). Les dimensions des régions couvertes par le réseau peuvent aller jusqu'à quelques centaines de kilomètres, à la limite de validité du modèle plan pour la Terre. Le signal utile se superpose localement aux phénomènes naturels et on supposera qu'un sous-ensemble (nommé *capteurs utiles*) inconnu a priori des capteurs est affecté par cette perturbation. Le sous ensemble *capteurs utiles* se modifie au cours du temps.

Dans notre expérimentation ce signal utile a été généré en passant un dipôle à travers un réseau de capteurs magnétiques scalaires (mesurant le module du champ). A chaque instant, l'ensemble des capteurs utiles est constitué de 1 ou 2 capteurs.

#### 1.2. Les signaux magnétiques naturels

Nous restreignons l'étude à la bande ULF. La généralisation du traitement à d'autres bandes ne pourra se faire qu'à la condition que les propriétés des bruits soient similaires à celles dont on se sert ici pour le traitement.

En plus du classique champ dipolaire terrestre  $\mathbf{bdip}(t,r)$ , un capteur magnétique limité à notre bande d'étude peut voir les effets des courants ionosphériques. Ils sont générateurs d'un bruit géomagnétique dont la période varie de quelques millisecondes à quelques années. Ce champ  $\mathbf{brgmag}(t,r)$  varie en temps et en espace mais nous verrons qu'il présente des

### ABSTRACT

Our aim is to analyse and separate the signals registered by an array of magnetic sensors. Our model consists of the superposition of the geomagnetic noise and an unknown useful signal. Using the properties of the geomagnetic noise, we show that array processing is well suited to the extraction of the signal. An application to a 5 sensor array illustrates the method in a simple case.

propriétés de cohérence spatiale utiles à exploiter par un réseau de capteurs.

Un capteur magnétique en mouvement mesurera, en plus de ces deux signaux (et éventuellement du signal utile) une perturbation d'origine géologique  $\mathbf{brgéol}(t,r)$  témoignant des propriétés magnétiques de rémanence et d'induction (inhomogènes en espace) des roches composant la terre. Le signal vu par ce capteur sera donc dans un premier temps :

$$\mathbf{c}(t) = \mathbf{bdip}(t,r) + \mathbf{brgmag}(t,r) + \mathbf{brgéol}(t,r)$$

Ces trois signaux sont variables en temps et en espace mais nous allons restreindre l'étude à de petites régions et réaliser un filtrage passe haut, le signal utile ne comportant par de composante continue:

$\mathbf{bdip}$  : il est considéré comme fixe en temps et en espace dans la mesure où les régions étudiées sont limitées et où le temps d'observation est petit devant sa période de variation (siècle).

$\mathbf{brgmag}$ : il est variable en temps et en espace. C'est ce signal qui perturbe le plus les mesures à poste fixe. Son spectre dans la bande ULF [CHAF 79] va en croissant vers les basses fréquences. Cependant, il offre des propriétés de cohérence spatiale que nous détaillerons dans la seconde partie pour les exploiter au mieux dans nos traitements.

$\mathbf{brgéol}$  : Dans le cas de sondes fixes il n'apporte qu'une composante continue aux signaux. Son influence n'est cependant pas négligeable dans la mesure où il peut modifier notablement la direction du champ total. L'emploi de magnétomètres à mesure de module du champ (magnétomètres scalaires) doit donc tenir compte de  $\mathbf{brgéol}$  même pour des sondes fixes, dans le cas où les perturbations géologiques sont grandes.

## 2. Le bruit Géomagnétique

Le bruit géomagnétique présente des propriétés de cohérence spatiale intéressantes

### 2.1. Modèle de l'environnement

Les capteurs magnétiques sont supposés placés dans des milieux isotropes et linéaires. Notre modèle général sera



classiquement constitué de trois milieux Air, Eau, Sol placés de haut en bas. L'interface Air-Eau est considérée comme plane et immobile.

Les sondes peuvent se trouver dans les trois types de milieux selon le signal utile recherché. Ces milieux diffèrent par leurs propriétés électriques puisque l'Air est non conducteur ( $\sigma_{\text{Air}}=0$ ), alors que l'eau est conductrice de conductivité supposée constante ou fonction uniquement de la profondeur ( $\sigma_{\text{Eau}}(z)$ ). Enfin, nous supposons que les propriétés du Sol sont inconnues ( $\sigma_{\text{Sol}}(r)$ ).

Pour les dimensions des antennes utilisées devant la distance des sources excitatrices et la courbure terrestre nous pouvons modéliser l'action des courants ionosphériques comme étant à l'origine d'une *Onde Plane* électromagnétique primaire  $H_p$  et  $E_p$  se propageant du haut vers le bas, selon une direction de propagation perpendiculaire à l'interface Air-Eau.

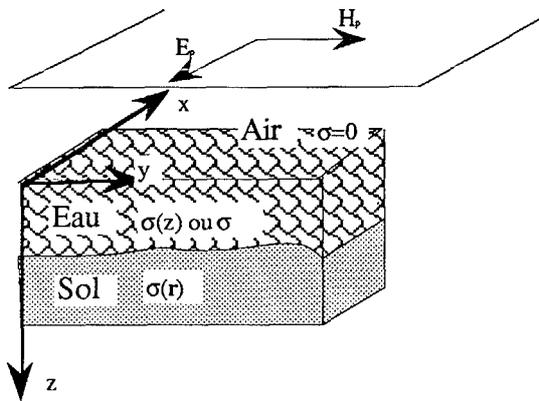


Fig 1 : Modèle de l'environnement des antennes

Notre modèle à trois couches est donc excité par cette onde plane (fig 1). Selon que nos capteurs seront situés dans l'Air ou dans l'Eau, les propriétés des signaux mesurés peuvent être différentes.

## 2.2. Mesures dans l'eau et dans l'air

**Eau :**  $\sigma_{\text{Eau}} = \sigma(z)$  est une bonne modélisation du milieu marin. Selon l'épaisseur d'eau, la profondeur des sondes et la fréquence d'étude, un amortissement du champ géomagnétique existe [CHAF 79]. Les bruits géomagnétiques sous la surface de l'eau sont d'autant mieux amortis qu'ils ont une fréquence élevée et que la profondeur d'eau à traverser est grande (effet de peau). Dans le cas où l'amortissement est trop faible pour qu'il soit imprudent de négliger les bruits géomagnétiques, l'effet des inhomogénéités de la conductivité du sol déforme l'onde plane primaire et le champ géomagnétique dépend alors de la position de la sonde

**Air :**  $\sigma_{\text{Air}} = 0$ : Pas d'amortissement. Pour des capteurs classiquement placés quelques mètres au dessus de l'interface, l'effet du sol est maximal. Nous sommes donc dans un cas similaire à celui de l'eau pour des études basse fréquence et/ou pour des profondeurs de mer faible.

## 2.3. Propriétés du bruit géomagnétique

Nous pouvons donc considérer le champ géomagnétique comme le résultat de l'excitation d'un milieu globalement inhomogène (Sol) par une onde plane ( $H_p, E_p$ ). Berdichevsky et Zdhanov [BERD 84] d'une part, et Egbert [EGBE 87] d'autre part montrent que le champ résultant prend des formes particulières selon le nombre de degrés de liberté de l'excitation.

Dans notre cas, celle-ci appartient à un espace de dimension 2.  $H_p$  (ou  $E_p$ ) est donc un élément de l'espace engendré par une combinaison linéaire de 2 vecteurs formant la base de l'espace des sources. Les auteurs montrent qu'alors, les champs résultant de l'excitation d'un milieu quelconque par une onde plane peuvent s'écrire comme une combinaison linéaire des transformées des vecteurs de la base de l'espace source par ce milieu. La transformation dépend de la conductivité du milieu et de la fréquence d'étude.

Un corollaire de cette propriété est que les champs mesurés dans une région où l'onde excitatrice peut être assimilée à une onde plane satisfont (cf notations fig 1):

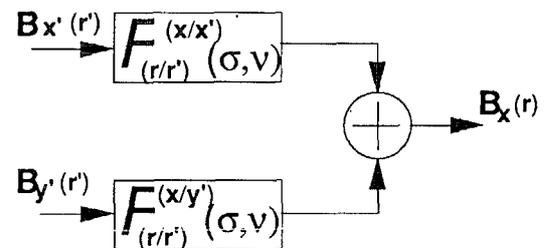


Fig 2 : Modèle des fonctions de transfert dans le cas ondes planes

Les fonctions de filtrage  $F$  dépendent de  $\sigma(r)$ . On peut les considérer comme stationnaires dans la mesure où le milieu ne se modifie pas en conductivité au cours du temps.

Il existe donc un filtrage *certain* - basé sur des propriétés *physiques* et non *statistiques* - qui permet de prédire une composante de  $B(r)$  en connaissant deux composantes indépendantes  $B_x(r')$  et  $B_y(r')$  (Fig 2).

## 3. Applications aux antennes de capteurs magnétiques.

### 3.1. introduction

Ces propriétés de prédictibilité du champ d'un point  $r$  à un point  $r'$  vont nous permettre d'établir une stratégie d'extraction du bruit géomagnétique. Le signal reçu sur le réseau s'écrit:

$$c_k(t) = \text{brgmag}_k(t) + \text{sigu}_k(t) \text{ pour } k = 1..N$$

$N$  est le nombre de mesures effectuées. On peut avoir plusieurs mesures par station dans le cas où les magnétomètres sont à composantes. *sigu* apparaît sur les capteurs du sous ensemble *capteurs utiles*. Ses propriétés varient selon le phénomène physique étudié, mais nous supposons toujours que sa puissance est inférieure à celle du bruit géomagnétique.

Nous pouvons imaginer qu'il existe, non loin de la zone couverte par l'antenne et dépourvue de la perturbation due au signal utile, un magnétomètre à composantes mesurant  $b_x(t)$  et  $b_y(t)$ . Alors, pour le  $k^{\text{ième}}$  capteur de l'antenne, il existe un couple de fonctions de transfert  $F_{kx}(v)$  et  $F_{ky}(v)$  telles que:

$$\text{Brgmag}_k(v) = F_{kx}(v) B_x(v) + F_{ky}(v) B_y(v)$$

Pour l'ensemble du réseau on obtient une famille de  $2N$  fonctions  $F$  et l'on peut adopter la notation matricielle:



$$\mathbf{Brgmag}(v) = \begin{bmatrix} F_{1x}(v) & F_{1y}(v) \\ F_{2x}(v) & F_{2y}(v) \\ \dots & \dots \\ F_{Nx}(v) & F_{Ny}(v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x(v) \\ B_y(v) \end{bmatrix}$$

soit :

$$\mathbf{Brgmag}(v) = \mathbf{F}(v) \cdot \mathbf{B}_{ref}(v)$$

Le modèle de signaux est donc pour le réseau:

$$\mathbf{C}(v) = \mathbf{Brgmag}(v) + \mathbf{Sigu}(v) \quad \text{soit :}$$

$$\mathbf{C}(v) = \mathbf{F}(v) \cdot \mathbf{B}_{ref}(v) + \mathbf{Sigu}(v)$$

Deux possibilités s'offrent à nous pour éliminer le bruit géomagnétique présent sur l'antenne:

- la soustraction de bruit
- la formation de directivité

### 3.2. soustraction simple

Dans la plupart des traitements réalisés sur des antennes magnétiques (fixes ou mobiles), une sonde de référence bruit seul est employée. La majorité des situations et le degré de finesse désiré en sortie ne nécessite alors qu'une simple soustraction entre les voies susceptibles de recevoir du signal et la référence. Cela revient à supposer que les fonctions de transfert inconnues  $F_{kx}(v)$  et  $F_{ky}(v)$  sont égales à l'unité pour tous les capteurs. Dans le cas de magnétomètres scalaires, on prend une des voies comme référence bruit seul et elle est soustraite de toutes les autres. Ceci fonctionne bien pour les cas où la sonde référence peut être placée non loin de la zone de signal utile (**bdip+brgéol** à la même orientation) et où le sous-sol a des propriétés identiques partout. Cette hypothèse est fautive en général.

### 3.3. filtrage par soustraction de bruit

Nous supposons ici que notre réseau est placé sur une zone pour laquelle (**bdip+brgéol**) $_k = \gamma_k$  dépend de  $k$ . La soustraction simple n'est déjà plus valable que pour des magnétomètres à composantes. (Les magnétomètres scalaires mesurent le module du champ total) Si l'on suppose en outre que  $\sigma_{sol}$  présente des inhomogénéités importantes, il faut alors se tourner vers d'autres méthodes (car alors le champ géomagnétique n'est plus constant en espace).

La soustraction de bruit suppose qu'un magnétomètre à composantes ait pu être mis en place non trop loin de l'antenne. (il faut que l'hypothèse ondes primaires planes soit vraie). Le signal utile peut alors être estimé [BAUD 89] [COMO 85] par:

$$\hat{\mathbf{C}}(v) = \mathbf{C}(v) - \gamma_{CB_{ref}}(v) \gamma_{B_{ref}B_{ref}}^{-1}(v) \mathbf{B}_{ref}(v)$$

### 3.4. Traitement d'antenne

Nous ne disposons pas toujours d'une référence bruit seul à deux composantes. La technologie des magnétomètres à composantes et les conditions de mesure selon des directions précises rendent difficile l'obtention des  $b_x$  et  $b_y$  avec une précision du même ordre que celle des magnétomètres à champ total dont notre antenne peut être constituée.

Dans ce dernier cas, notre système d'acquisition est constitué de  $N$  sondes à champ total ou à composantes sans aucune autre référence.

$$\mathbf{C}(v) = \mathbf{F}(v) \cdot \mathbf{B}_{ref}(v) + \mathbf{Sigu}(v)$$

$\mathbf{F}$  est une grandeur certaine selon le paragraphe 2.  $\mathbf{B}_{ref}$  est le vecteur des sources que l'on ne peut mesurer. La matrice interspectrale formée sur l'antenne s'écrit [TURC 82]:

$$\gamma(v) = E[\mathbf{C}(v) \cdot \mathbf{C}(v)^\dagger] = \mathbf{F}(v) \cdot E[\mathbf{B}_{ref}(v) \cdot \mathbf{B}_{ref}(v)^\dagger] \cdot \mathbf{F}(v)^\dagger$$

soit:

$$\gamma = \sum_{w \in \{x,y\}} \begin{bmatrix} F_{1w}(v) \\ F_{2w}(v) \\ \dots \\ F_{Nw}(v) \end{bmatrix} \gamma_{B_w B_w}(v) \begin{bmatrix} F_{1w}^*(v) & F_{2w}^*(v) & \dots & F_{Nw}^*(v) \end{bmatrix}$$

que l'on peut écrire

$$\gamma = \sum_{w \in \{x,y\}} \gamma_{B_w B_w}(v) \mathbf{F}_w(v) \cdot \mathbf{F}_w^\dagger(v)$$

Les  $\mathbf{F}_x$  et  $\mathbf{F}_y$  sont donc vecteurs propres de la matrice interspectrale formée sur les  $N$  sondes du réseau en l'absence de signal utile. Le bruit géomagnétique peut donc être isolé par projection dans l'espace bruit géomagnétique noté  $E_{brgmag}$  engendré par les 2 premiers vecteurs propres de la matrice interspectrale estimée en l'absence de signal utile.

L'estimateur de  $\mathbf{Brgmag}$  est perturbé en la présence de  $\mathbf{Sigu}$  car une partie de ce signal peut se projeter sur  $E_{brgmag}$ .

$$\hat{\mathbf{Brgmag}}(v) = \sum_{i=1}^2 [\mathbf{C}(v) \cdot \mathbf{VP}_i(v)] \cdot \mathbf{VP}_i^\dagger(v)$$

$\mathbf{Sigu}$  est estimé par soustraction du bruit géomagnétique estimé du signal total de réseau.

Lorsque le signal utile est présent sur le réseau, l'estimée de la matrice interspectrale est modifiée. la puissance du signal utile vient en partie se mettre sur les deux premières valeurs propres et peut perturber l'orientation des deux premiers vecteurs propres. Il est donc important d'estimer ceux-ci durant une période où l'on est sûr de ne pas avoir de signal utile.

Sans autres hypothèses sur le signal utile, nous constatons donc que l'estimation sera d'autant meilleure que le nombre de capteurs est grand. En effet, l'estimateur construit est la moyenne des filtrées des signaux des sondes. Cette moyenne est perturbée par la présence des capteurs du sous-ensemble *capteurs utiles*. Le biais de cet estimateur sera d'autant plus réduit que le nombre de termes de la moyenne sera important et que l'écart des *capteurs utiles* à cette moyenne sera faible.

### 3.5. Pondération des capteurs

Nous pouvons maintenant envisager de modifier l'estimateur du bruit géomagnétique en tentant d'incorporer les connaissances que nous avons sur le signal utile. Ces connaissances doivent nous permettre, à l'aide d'un système de décision, de partitionner de façon adaptative l'ensemble des capteurs en deux groupes *floes*: le sous-ensemble *utile* et le sous-ensemble *bruit seul*. Nous ne nous attacherons pas ici à construire ce système de décision et supposons que le partitionnement est déjà fait.



Cette partition peut être concrétisée en affectant un coefficient  $\alpha_k(t)$  réel entre 0 et 1 d'autant plus proche de 1 que le capteur sera suspecté de recevoir du signal utile. Si l'on suppose que le groupe *utile* est lentement variable dans le temps,  $\alpha_k$  peut être considéré comme constant sur l'intervalle de temps considéré et l'on pourra adopter la méthode de projection pondérée suivante :

En posant  $\beta_k = N \frac{(1-\alpha_k)}{\sum_{l=1}^N (1-\alpha_l)}$  pour k de 1 à N

$$\hat{\text{Brgmag}}(v) = \sum_{i=1}^2 [C(v) \cdot \text{Diag}(\beta) \cdot \text{VP}_i(v)] \cdot \text{VP}_i(v)$$

où  $\text{Diag}(\beta)$  est la matrice  $N \times N$  diagonale formée sur les  $\beta_k$ .

L'estimation est une moyenne pondérée sur tous les capteurs. Les capteurs du sous ensemble *référence bruit seul* ont une pondération plus importante que ceux appartenant au groupe *capteurs utiles*. La méthode ainsi conçue gagne en précision tout en restant robuste aux erreurs de classification.

#### 4. Application expérimentale

##### 4.1. Conditions pratiques

La méthode d'extraction du bruit géomagnétique sur un réseau de sondes magnétiques *scalaires* a été mise en oeuvre pour 5 capteurs<sup>1</sup>. Pour des raisons expérimentales, les sondes ont été disposées sur un terrain géologiquement favorable (milieu tabulaire) et placées à des distances de l'ordre de la centaine de mètres les unes des autres. Les sondes sont basées sur le principe de la Résonance Magnétique Nucléaire et permettent de mesurer le centième de nanotesla.

Le signal utile a été généré par un passage de dipôle touchant successivement 3 des 5 capteurs.

Les signaux sont échantillonnés à 2Hz. Ils sont filtrés passe bande de 0,001 Hz à 0,1 Hz.

##### 4.2. Extraction du bruit géomagnétique

Le sous ensemble capteurs utiles étant supposé inconnu, nous avons appliqué la méthode de séparation par matrice interspectrale par projection simple puis pondérée. La matrice interspectrale est estimée à l'aide de la méthode du périodogramme lissé [TURC 82]. Les transferts inter capteurs sont très proches de l'unité et une seule valeur propre permet de reconstruire tout le bruit géomagnétique. Ceci est dû au fait que les sondes sont très rapprochées et disposées sur un milieu tabulaire qui ne déforme que très peu l'onde plane primaire.

Les figures font apparaître chacune 3 courbes. Deux capteurs sur les 5 ont été sélectionnés. Le premier voit le signal dipolaire (Est c1) alors que le second doit rester nul (Est c4). Le véritable signal c1 est représenté avec les croix. Nous constatons que le signal utile se projette en partie sur la direction du bruit géomagnétique. Par soustraction, un artefact apparaît sur la sonde 4 (Fig 3). Le filtrage pondéré permet de réduire notablement l'erreur. On retrouve alors la bonne amplitude sur le capteur 1 et un signal très faible sur le 4 (cf fig 4).

<sup>1</sup>La campagne de mesure a pu être réalisée grâce à Mme N. Kernevez et Mr H Glénat du LETI/DSYS/SESA

## 5. Conclusion

L'étude des propriétés des bruits géomagnétiques reçus sur une antenne nous ont permis de dégager les méthodes en vue de son élimination. Si une station de référence existe, la soustraction de bruit est la démarche la plus efficace. Dans le cas où une référence n'est pas connue, le bruit géomagnétique peut être isolé par projection pondérée sur les sous espaces engendrés par les 2 premiers vecteurs propres de la matrice interspectrale. La pondération permet d'introduire, à l'aide d'un système de décision, les connaissances que l'on peut avoir sur le signal utile.

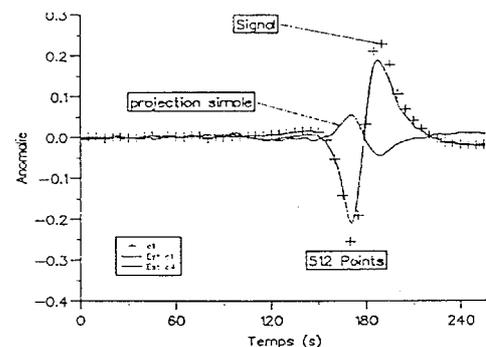


Fig 3 : Projection simple.

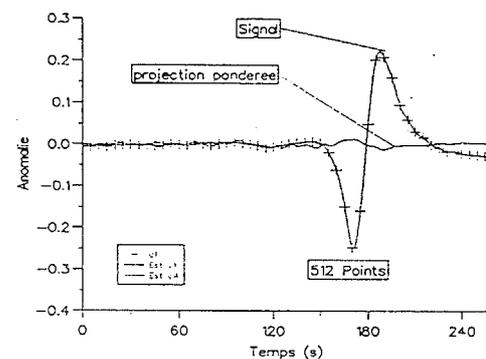


Fig 4 : Projection pondérée.

## Bibliographie

- [BAUD 89] BAUDOIS Daniel, SERVIERE Christine, SILVENT André; *Soustraction de bruit Analyse et synthèse bibliographique*; Traitement du signal vol.6 n°5 1989.
- [BERD 84] BERDICHEVSKI Mark N., ZHDANOV Michael S.; *Advanced théory of deep Géomagnétic sounding*; Elsevier 1984.
- [CHAF 79] CHAFFEE Edmund J.; *Low frequency geomagnetic fluctuations (0.01 to 3 Hz) on the florr of Monterey bay*; Naval postgraduate school Monterey California.
- [COMO 85] COMON Pierre ; *Traitement de signaux magnétiques multivariables*; Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble 1985.
- [EGBE 87] EGBERT Gary David, *A multivariate approach to the analysis of géomagnétic array data*, thèse University of Washington 1987.
- [LEGRA 89] LEGRAND J.P., SIMON P.A.; *Solar cycle and géomagnétic activity : A review for géophysicist Part I et part II*; Annales Geophysicae 1989,7,(6)
- [TURC 82] TURCAT-LATOMBE Claudine, *Détection et caractérisation des signaux à plusieurs composantes à partir de la matrice interspectrale*, Thèse de l'Université Scientifique et Médicale et de l'Institut National Polytechnique de Grenoble 1982