



Université de Rennes 1
Campus de Beaulieu
35042 RENNES Cédex



Centre Spatial de Toulouse
18 avenue Edouard Belin
31 401 TOULOUSE Cedex 4



Centre d'Etudes Spatiales
de la BIOSphère - bpi 2801
31 401 TOULOUSE Cedex 4

Implémentation de méthodes de corrections et de désagrégation de données satellites SPOT

Sous la responsabilité de :
Benoît DUCHEMIN (CESBIO)
Pierre-Antoine ANGELINI (IFSIC)

Florent LASRY
DESS CCI
2001-2002

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement :

Jean-Claude Menaut, directeur du CESBIO, et toute **l'équipe du projet Sud-Med**
pour leur accueil au laboratoire ;

Benoit Duchemin, responsable de stage du CESBIO, pour son encadrement et ses conseils ;

Pierre-Antoine Angelini, responsable de stage de l'IFSIC, pour avoir suivi ce travail ;

Vincent Simonneaux pour sa collaboration et sa participation à la soutenance ;

Etienne Groult, Philippe Maisongrande et Gérard Dedieu
pour leur aide sur la correction atmosphérique ;

Pierre François pour son apport des données d'occupation du sol,
et **Mickaël Magnac** pour les données de la FAO.

Sommaire

Remerciements.....	2
Sommaire	3
Introduction	5
a- Présentation du CESBIO.....	5
b- Projet Sud-Med.....	5
c- Objectifs du stage	6
I - PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE	7
1- Physique du problème	7
a - Comportement spectral de la végétation.....	7
b - Indices de végétation	7
c - Déconvolution de Faivre	8
d - Modèles de la FAO.....	9
2- Contexte technique et objectifs	10
a- Etalonnage et corrections	10
b- Correction géométrique et superposition	11
c- Déconvolution	13
d- Schéma synthétique de la chaîne de traitement	14
3- Données et outils	15
a- Système SPOT	15
b- Produits HRVIR et VEGETATION.....	15
c- Zone d'étude	18
d- Langages et outils	19
II - DEVELOPPEMENT ALGORITHMIQUE.....	21
1- Préparation du jeu de données	21
a- Décompression et renommage.....	21
b- Corrections géométriques et extraction HRVIR.....	21
c- Ecriture VEGETATION au format ENVI et création de header.....	22
d- Changement de projection et recentrage (extraction) des VEGETATION	23
2- Correction des effets atmosphériques	24
a- Extraction des coefficients atmosphériques.....	24
b- Modification et adaptation du code SPALTO.....	25
c- Interfaçage avec IDL et ENVI.....	25
3- Autocorrélation automatique	29
a- Boucle de corrélation.....	29
b- Schéma de l'algorithme.....	30
c- Interfaçage et sorties.....	31
4- Déconvolution de séries temporelles.....	32
a- Adaptation des codes.....	32
b- Algorithme d'estimation des réflectances	32

III - RESULTATS ET ANALYSE.....	34
1- Correction des effets atmosphériques.....	34
2- Superposition des produits HRV et VEGETATION.....	35
3- Perspectives de la déconvolution	37
Conclusion	38
Table des illustrations.....	39
Acronymes.....	40
Bibliographie.....	41
Annexes.....	42
Annexe 1 : Coefficients atmosphériques extraits des images Spot VEGETATION-P.....	42
Annexe 2 : Exemple de codage d'un programme IDL : fichier auto_correl.pro	43
Annexe 3 : Effets de la correction atmosphérique sur les bandes HRV XS1 et 2 (8 février 2002)	44

Introduction

a- Présentation du CESBIO

Le CESBIO, ou Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère, est une unité mixte de recherche (UMR) entre le CNES, l'IRD, le CNRS et l'université Paul Sabatier de Toulouse. Cette unité pluridisciplinaire, dont les compétences se situent à l'interface des sciences physiques et des sciences de la Vie, a pour vocation de développer les connaissances sur le fonctionnement et les dynamiques de la biosphère continentale à différentes échelles spatiales et temporelles, en s'appuyant principalement sur des données satellitaires. Le laboratoire conduit des recherches dans le domaine de l'observation des surfaces continentales en relation avec la modélisation biophysique, écologique et hydrologique. Il participe également à la définition de missions spatiales et au traitement des données de télédétection.

Le laboratoire est divisé en trois équipes :

- l'équipe 1 est chargée de l'extraction de l'information structurale et fonctionnelle des surfaces à partir des données de télédétection, afin d'obtenir une caractérisation quantitative détaillée des états de surface et d'en assurer le suivi ;
- l'équipe 2 intervient sur la modélisation du fonctionnement des écosystèmes, par l'association de méthodes écologiques et physiques qui permettent de comprendre et de prédire le fonctionnement des couverts végétaux en termes d'organisation et d'échanges avec le sol et l'atmosphère (bilans d'énergie, de carbone et d'eau) ;
- l'équipe 3 travaille sur la modélisation de la composante biosphérique du cycle hydrologique. Ce thème est destiné à caractériser le comportement hydrique des surfaces continentales sur des bassins versants d'échelle croissante (de quelques km² à quelques milliers de km²).

Ces trois équipes collaborent au sein de trois projets :

- Le projet « **Sud-Ouest** », où l'on cherche à estimer les bilans de carbone et d'eau en région Midi-Pyrénées, est un exemple type de recherche pour lequel il faut comprendre le fonctionnement d'un ensemble hétérogène d'écosystèmes ;
- Le projet « **Global** », consacré à l'étude des variations interannuelles de l'activité végétale terrestre à l'échelle globale ou semi-continentale ;
- Le projet « **Sud-Med** », qui a fourni le cadre de ce stage et que l'on présente en détail au paragraphe suivant.

Du point de vue de l'organisation informatique, le CESBIO est un sous réseau du Centre Spatial de Toulouse (CST), et dispose d'un parc d'une soixantaine de PC et d'une quinzaine de stations UNIX, en réseau local Ethernet/10Bt sous adressage IP avec serveur d'application, serveur de mail, d'impression...

b- Projet Sud-Med

Le projet « *Sud-Med : fonctionnement et ressources hydro-écologiques de régions semi-arides : caractérisation, modélisation et prévision* » est mené conjointement par une équipe de l'IRD basée au Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère et à la Faculté des Sciences de Semlalia (Université Cadi Ayyad, Marrakech). Il a pour objectif de décrire le fonctionnement hydro-écologique de régions semi-arides, avec pour site test en 2001-2004 la région de Marrakech-Tensift-Al Haouz s'étendant sur une superficie de 31827 km². Il se propose de développer des méthodologies permettant d'intégrer les informations de terrain, les modèles de processus et les mesures satellitaires pour documenter, comprendre et prévoir l'évolution d'une région semi-aride hétérogène en vue d'une gestion durable.

c- Objectifs du stage

Le projet Sud-Med, dans le cadre duquel s'inscrit ce travail, explore de multiples voies et méthodes d'utilisation des données satellitaires pour caractériser les écosystèmes semi-arides et contrôler la modélisation de leur évolution spatiale et temporelle. Ce projet s'attache en particulier à estimer l'évolution de la ressource en eau. La mise en œuvre de méthodes simplifiées d'estimation de l'évapotranspiration des couverts agricoles en plaine de Marrakech (zone test du projet) fournit le cadre général de cette étude. La réalisation de cet objectif s'appuie largement sur l'utilisation de méthodes associées à l'exploitation d'instruments dédiés à l'observation de la terre opérant dans des domaines de longueur d'onde optique (0.5-4 μm), thermique et micro-onde. Seules les données optiques, qui renseignent l'état de développement des couverts végétaux, seront utilisées ici.

Dans le domaine optique, on distingue deux principaux types de capteurs pour l'observation de la terre : capteurs à haute résolution spatiale et capteurs grand champ. Le premier type de capteurs (SPOT-HRV, Landsat-TM, TERRA-ASTER) offre une résolution spatiale décimétrique mais leur répétitivité temporelle est faible (autour de 1 mois). Il n'autorise pas un suivi intra-annuel de la dynamique des couverts agricoles et naturels. Les capteurs grand champ (SPOT-4/VEGETATION, NOAA-AVHRR, TERRA-MODIS) offrent *a contrario* une fréquence d'acquisition journalière adaptée au suivi temporel de la surface à des échelles régionales. Du fait de leur résolution spatiale kilométrique, ils ne permettent cependant pas d'attribuer des évolutions à un écosystème particulier : ils observent généralement une mosaïque de surfaces de différentes natures au sein d'un même pixel.

Les modèles de bilan hydrique permettant de prévoir les évapotranspirations réelles et les besoins (potentiels) en eau des cultures, nécessitent de connaître la dynamique des couverts à un pas de temps de l'ordre du jour ou de la dizaine de jours. L'évolution des couverts végétaux peut être suivie par télédétection au moyen (simple) d'indices de végétation issus des observations dans le domaine optique. Dans ce contexte, il apparaît fort utile de pouvoir exploiter parallèlement les deux types de capteurs cités plus haut, pour bénéficier simultanément de la haute résolution spatiale et de la forte répétitivité temporelle. On est alors confronté à trois types de problèmes :

- homogénéiser la radiométrie de la surface observée, par étalonnage (passage de valeurs numériques à des valeurs physiques) et correction des effets dus à l'influence de l'atmosphère ;
- rendre superposables des données obtenues à différentes résolutions (décimétriques à kilométriques), par géoréférencement et co-localisation ;
- restituer la dynamique temporelle de chaque composante des pixels kilométriques.

L'objectif de ce stage est donc d'implémenter des méthodes de corrections et de désagrégation permettant l'exploitation simultanée des deux types de capteurs (SPOT HRVIR et VEGETATION dans notre cas). On cherche ainsi à préparer les données de télédétection pour fournir aux modèles de bilan hydrique l'évolution spatiale et temporelle des couverts agricoles.

Les trois types de problèmes cités ci-dessus seront traités séquentiellement, et correspondent aux trois phases de la chaîne de traitement mise en place :

- 1) Etalonnage et traitement des effets atmosphériques ;
- 2) Superposition spatiale, pour fournir un coalignement précis d'images aux résolutions différentes ;
- 3) Déconvolution des séries d'images à faible résolution spatiale et haute répétitivité temporelle, afin d'obtenir des profils de réflectances caractéristiques des couverts dominants dans la région de Marrakech.

I - PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE

Ce chapitre expose le contexte technique particulier de ce travail et les objectifs de la chaîne de traitement réalisée. Après quelques rappels sur les aspects physiques du problème, les différentes étapes de la correction seront détaillées pour aboutir au schéma général de la chaîne de traitement. Les données et les outils mis en œuvre seront enfin décrits.

1- Physique du problème

a - Comportement spectral de la végétation

Le rayonnement solaire incident reçu par une surface est soit réfléchi, soit transmis, soit absorbé par celle-ci, en différentes proportions selon la longueur d'onde, la géométrie d'observation, la nature et la structure des objets composant la surface. C'est la réflectance¹ qui est captée par les satellites d'observation de la Terre. Pour une géométrie d'observation donnée, celle-ci varie principalement en fonction de la quantité de biomasse verte (qui peut-être caractérisée par l'indice foliaire), du taux de recouvrement par la végétation, de la nature et de la structure (rugosité) du sol et des couverts. La figure ci-dessous décrit le comportement spectral type de la végétation et du sol selon la longueur d'onde, et la met en parallèle avec les principales bandes spectrales de l'instrument qui servira à cette étude.

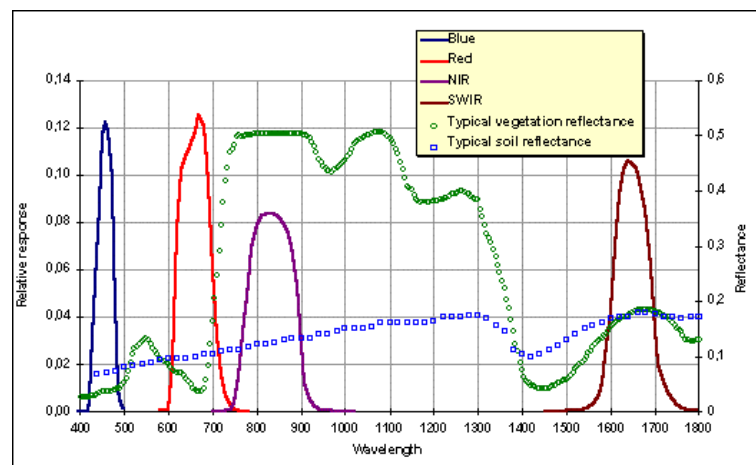


Figure 1 : Courbes de réflectance type de la végétation et du sol selon la longueur d'onde

Un des objectifs à terme de l'étude étant d'extraire des profils de réflectances caractéristiques de couverts végétaux, nous décrirons ici les propriétés optiques de la végétation (*typical vegetation reflectance* sur la figure 1). Dans le visible (0,4-0,7 μm), la majeure partie du rayonnement est absorbée par les feuilles pour la photosynthèse : dans le vert (0,55 μm) on observe un pic de réflectance (à cette longueur d'onde, 15% du rayonnement est réfléchi) ; dans le PIR (0,7-1,3 μm), il a peu d'absorption par le feuillage et le rayonnement est généralement transmis et réfléchi dans des proportions grossièrement identiques ; dans le MIR (1,3-2,5 μm), les propriétés optiques dépendent de la teneur en eau.

b - Indices de végétation

Ils se déduisent directement des données satellites en combinant les informations contenues dans les bandes spectrales « Rouge » et « PIR ». Ces indices sont corrélés à l'activité photosynthétique des couverts

¹ La réflectance est la part du rayonnement réfléchi vers l'atmosphère dans la direction de visée. Elle varie entre 0 et 1.

et mettent en valeur le contraste entre le sol et la végétation. Le principal de ces indices est le NDVI² (Normalized Difference Vegetation Index) :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

Avec :

ρ_{PIR} : réflectance dans le PIR

ρ_R : réflectance dans le rouge

Pour la majorité des surfaces continentales, l'indice NDVI varie entre 0 et 1 et augmente avec la présence de végétation photosynthétiquement active, qui provoque en terme de réflectance une augmentation dans le PIR et une diminution dans le rouge (voir figure précédente).

c - Déconvolution de Faivre

En télédétection, toute image satellite peut être considérée comme une matrice de pixel. Lorsque la résolution du pixel est grossière, la réflectance de ce dernier est alors égale à la somme des réflectances des objets qui le compose : on parle alors de pixel mélangé ou « *mixed pixel* ». Le but du modèle de Faivre est de proposer un modèle statistique permettant de prédire la réflectance des différentes cultures présentes dans les « *mixed pixel* », connaissant les proportions occupées par chacune des cultures sur une partie (importante) ou la totalité de l'image. Ces proportions sont obtenues à partir de cartes d'occupation du sol établies sur la région étudiée.

Description du modèle :

Nous supposons connues le nombre de classes de végétation sur la région étudiée (p) et les proportions de chaque classe de végétation dans chacun des pixel. On pose alors :

x_i^k : proportion de la culture k dans le pixel i.

Y_i : réflectance observée sur le pixel i.

R_i^k : réflectance estimée de la classe (ou culture) k sur le pixel i si celui-ci était uniquement composé de la culture k.

Le problème est de prédire $R_i^k \forall i$ et $\forall k$, via l'équation suivante :

$$Y_i = \sum_{k=1}^p x_i^k R_i^k + \varepsilon_i$$

dans lequel on suppose que $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2) \forall i$

NB : Si le pixel i était uniquement composé de la culture K, ce modèle deviendrait :

$$Y_i = R_i^K + \varepsilon_i$$

où R_i^K est la vraie valeur de réflectance de la culture K sur le pixel i.

ε_i est l'erreur de mesure.

Y_i est la valeur mesurée.

L'approche la plus simple consiste à supposer que la réflectance d'une culture est la même sur tous les pixels. Nous avons alors $R_i^k = \theta^k \forall k$ et la simplification de l'équation suivante :

² Rouse et al., 1994.

$$Y_i = \sum_{k=1}^p x_i^k \theta^k + \varepsilon_i, \text{Rik} = \theta^k$$

Les paramètres θ^k peuvent alors être estimés par moindres carrés sur l'ensemble des pixels étudiés. Ce modèle étant cependant simpliste (il existe en effet des variations de la réflectance de la culture k pour les différents pixels dues aux variations des conditions agro-météorologiques), nous proposons un autre modèle permettant de mieux restituer l'effet individuel du pixel. C'est le modèle aléatoire suivant :

$$\hat{R}_i^k = \hat{\theta}^k + \frac{x_i^k \hat{\sigma}_k^2}{\hat{\sigma}_i^2} [Y_i - X\hat{\Theta}]$$

dans lequel X est la matrice des proportions et $\hat{\Theta}$ est le vecteur des estimations des θ^k ,

$$\hat{\sigma}_k^2 \text{ est l'estimation de } \sigma_k^2 \text{ et } \hat{\sigma}_i^2 = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 + \sum_{k=1}^p [x_i^k]^2 \hat{\sigma}_k^2.$$

Dans ce modèle, les écarts $Y_i - X\hat{\Theta}$ entre les valeurs observées et les valeurs estimées sont décomposées avec des écarts dus aux différentes cultures, à la proportion qu'elles occupent dans chaque pixel de la région étudiée et à leur variance (intra-culturelle) naturelle. C'est ce dernier modèle que l'on cherche à implémenter *in fine* dans cette étude.

d - Modèles de la FAO³

Les données de télédétection peuvent s'articuler avec des modèles phénologiques simples par des relations entre les différents indices décrits plus haut. Le modèle qui nous intéresse ici correspond au **besoin en eau** ou **ETC**, c'est à dire à l'évapotranspiration requise par la plante pour une production optimale. La relation est de la forme :

$$\boxed{\text{Etc} = Kc \text{ Et0}}$$

- avec **Kc**, coefficient cultural, est un coefficient de passage entre une formation de type gazon à la culture considérée. Il est fonction du type de culture et du stade phénologique, et dépend en premier lieu de la quantité de biomasse verte. La quantité de biomasse est obtenue à partir d'un indice foliaire, le LAI⁴, qui représente la quantité de feuille pour une surface de sol élémentaire, et qui se calcule facilement par la relation suivante avec le NDVI (Asrar et al., 1984) :

$$\boxed{LAI = \frac{-1}{\alpha} \log \left(1 - \frac{NDVI - NDVI_{sol}}{NDVI_{max} - NDVI_{sol}} \right)}$$

Avec : $1/\alpha$: valeur maximale du LAI
 $NDVI_{sol}$: valeur minimale possible du NDVI
 $NDVI_{max}$: valeur maximale possible du NDVI

Au final, on a donc $Kc = \text{fonction}(LAI)$ et $LAI = \text{fonction}(NDVI)$, et on connaît le NDVI.

- avec **Et0**, ou évapotranspiration potentielle, qui correspond à une demande climatique d'un gazon totalement couvrant et bien irrigué (dans des conditions optimales). On le trouve dans les manuels de référence.

Les données de télédétection optique (NDVI) procurent une estimation des coefficients culturaux. Elles permettent également un suivi des cultures (semis, développement maximum, récolte) utile pour fixer la période de validité du modèle et déterminer les stades phénologiques des couverts.

³ Food and Agriculture Organization of the United Nations.

⁴ Leaf Area Index, cf Acronymes.

2- Contexte technique et objectifs

Le fait de travailler sur de gros volumes de données impose une automatisation des tâches et le développement de chaînes de traitement fiables et bien conçues. Les acquisitions régulières (horaires, quotidiennes, mensuelles...) et sur des périodes de temps longues accumulent des bases de données image que seuls des algorithmes rapides peuvent traiter. De plus, il faut prendre en compte les multiples formats de ces données et leurs évolutions.

D'autre part, le développement de chaînes de traitement de ce type doivent permettre des interfaces clairs avec des outils interactifs de traitement d'image et la fourniture d'outils clés en main, faciles à utiliser et bien documentés, pour les futurs utilisateurs.

Nous avons tenté de respecter ces deux contraintes de développement informatique pour atteindre nos objectifs scientifiques. Les principes associés à ces objectifs – homogénéiser la radiométrie, rendre superposable des images de résolutions différentes, procéder à la déconvolution d'images à faible résolution spatiale – sont successivement décrits dans ce qui suit. Un schéma récapitulatif de la chaîne de traitement que nous avons développée est donnée à la fin de cette section.

a- Etalonnage et corrections

Le besoin d'étalonnage provient tout d'abord de la nécessité de donner une interprétation physique à la valeur numérique de chaque pixel de l'image, en la reliant à une grandeur appelée luminance au sommet de l'atmosphère, et par l'intermédiaire d'un coefficient d'étalonnage absolu. Ce coefficient prend en compte la dynamique et l'évolution de la sensibilité du capteur dans le temps (coefficients A_k fournis par le CNES, voir la figure 2 ci-dessous). Il sert à assurer une cohérence temporelle des mesures, en palliant la dérive radiométrique des capteurs :

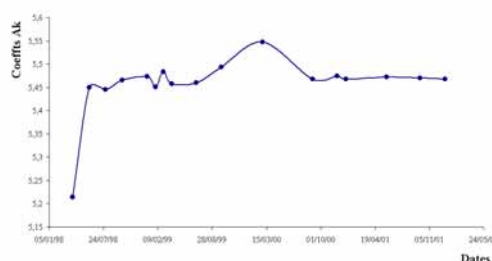


Figure 2 : Variation temporelle d'un coefficient A_k (HRVIR2, MIR)

Toute image optique prise d'un satellite doit être ensuite convertie en réflectance TOA (*Top Of Atmosphere*), c'est à dire au sommet de l'atmosphère. Le principe consiste en la normalisation de la luminance par rapport à l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère. Ce dernier est fonction de l'angle d'élévation solaire et de la distance terre-soleil.

Enfin, l'atmosphère est un milieu diffusant et absorbant interagissant avec les ondes électromagnétiques. Sa composition gazeuse, moléculaire et particulaire est stable dans le temps, à l'exception toutefois de l'ozone, de la vapeur d'eau, et de la concentration et du type d'aérosols. Ces derniers, ainsi que l'altitude de la surface observée caractérisée par sa pression équivalente, conditionnent l'épaisseur optique et sont très dépendants du lieu, du sol et de la date de la prise de vue. Afin d'éliminer au maximum ces effets de l'atmosphère, il est nécessaire d'appliquer des corrections prenant en compte principalement les trois paramètres influents (ozone, vapeur d'eau et aérosols), et ce par l'intermédiaire du programme SPALTO, dont le schéma algorithmique est donnée en figure 3.

La correction atmosphérique réalisée dans SPALTO utilise le programme SMAC⁵, qui traduit sous forme algorithmique la nouvelle méthode de correction atmosphérique « 6S » (Vermote et al., 1997). Pour chaque valeur de réflectance TOA calculée, SPALTO applique SMAC, et l'image de réflectance TOA est

⁵ Simplified Method for the Atmospheric Correction (Rahman et Dedieu, 1994).

transformée en une image de réflectance en surface, c'est à dire en une image qui aurait été acquise en l'absence d'atmosphère. Le programme SPALTO s'applique uniquement aux produits HRVIR (les produits VEGETATION étant déjà corrigés radiométriquement).

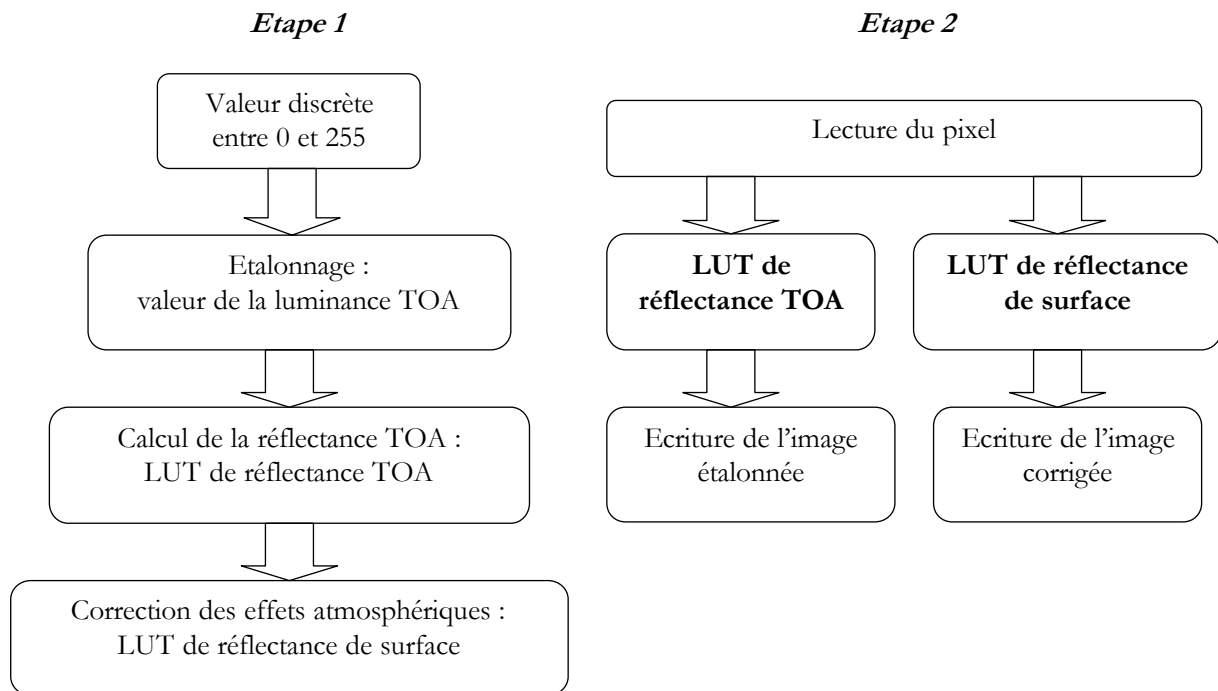


Figure 3 : Schéma de l'algorithme SPALTO
(source Groult E.)

b- Correction géométrique et superposition

Les données fournies par les capteurs optiques obéissent à des contraintes techniques qui obligent à un compromis entre la fréquence des acquisitions et leur résolution. Sur le satellite SPOT 4, l'instrument VEGETATION permet de visualiser quotidiennement l'ensemble de la surface terrestre à la résolution kilométrique alors que l'instrument HRVIR fournit nominalemeent une image tous les 26 jours (qui peut-être inexploitable à cause de la présence de nuages) à une résolution de 20 mètres pour une région donnée.

Afin de bénéficier de la haute résolution spatiale des images HRV et de la haute résolution temporelle des produits VEGETATION, il est nécessaire de pouvoir effectuer un cogéoréférencement précis des deux produits. Théoriquement, il est possible de cogéoréférencer HRV et VEGETATION à partir des informations de localisation fournies avec ces données mais l'erreur moyenne de colocalisation est de 300 mètres, ce qui est bien trop important à l'échelle HRV (autour de 15 pixels d'erreur). Il est donc indispensable de développer un algorithme permettant d'obtenir cette superposition.

Considérant le géoréférencement des images HRV (réalisé à partir des cartes topographiques et de points d'appui au sol) comme la référence en matière de précision de calage, la méthode développée ici consiste à rechercher la corrélation optimale entre les valeurs des comptes numériques des deux images considérées comme deux matrices, afin d'obtenir les coordonnées communes des points de coalignement. Ces coordonnées permettront un géoréférencement précis des images VEGETATION, et une superposition HRV- VEGETATION avec une erreur minimum de 20 mètres.

La méthode d'autocorrélation développée ici, dont le principe est donnée en figure 4, consiste à dégrader l'image HRV à la résolution VEGETATION, puis à extraire deux matrices de taille identique qui seront

transformées sous forme de vecteurs avant d'être corrélées. On cherche ensuite la corrélation maximale en jouant sur l'origine de la dégradation HRV et les possibilités de superposition entre l'image VEGETATION et la donnée HRV dégradée.

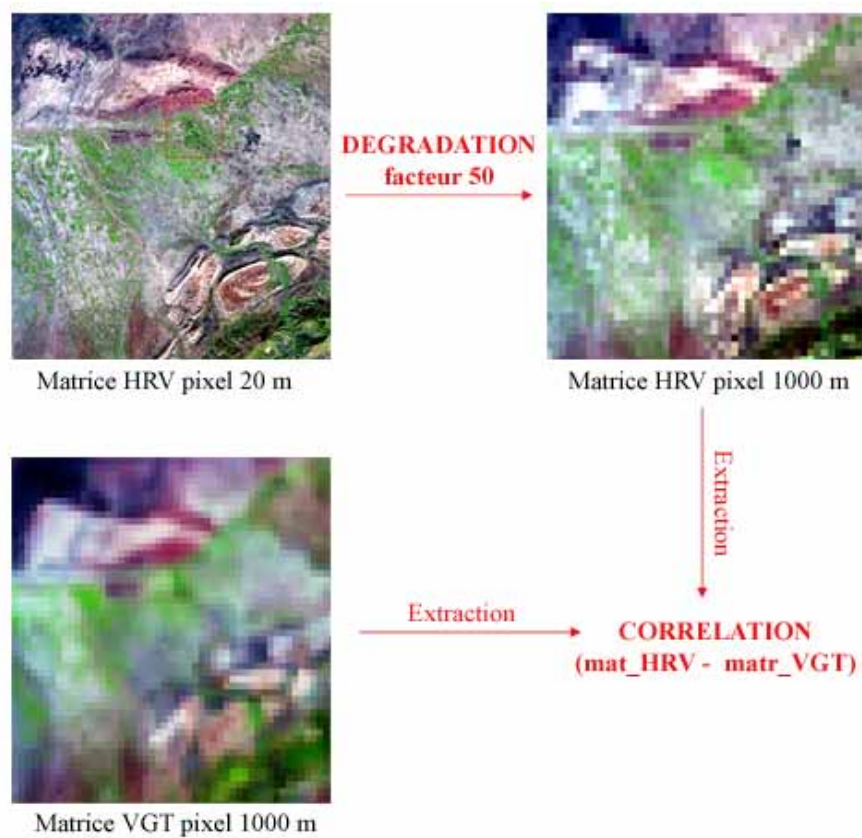


Figure 4 : Principe de l'autocorrélation HRVIR-VEGETATION.

c- Déconvolution

Les méthodes de déconvolution spectrale (ou spectral-unmixing) ont été développées afin de tirer parti à la fois de la haute résolution spatiale et de la haute répétitivité en combinant l'information issue de deux types de capteurs (ici VEGETATION et HRVIR). Les méthodes classiques de déconvolution (linéaires) consistent à fixer préalablement les end-members (composantes spectrales homogènes, issues de surfaces « pures ») afin d'obtenir par la modélisation des pixels une estimation des proportions de couverture du sol.

Le modèle de déconvolution utilisé ici (cf partie I § 1-c) applique une méthode inverse afin de déterminer, par prédiction, la réponse spectrale de chaque thème (classe) au sein de chaque pixel étudié. Dans ce modèle, la réflectance de chaque pixel VEGETATION est la combinaison linéaire des réflectances de chaque classe présente dans le pixel, pondérée par son pourcentage d'occupation au sol. A partir d'une carte d'occupation du sol établie à l'aide des données SPOT/HRV, la déconvolution des séries temporelles acquises par SPOT-4/VEGETATION doit permettre d'obtenir des profils de réflectances caractéristiques des couverts dominants.

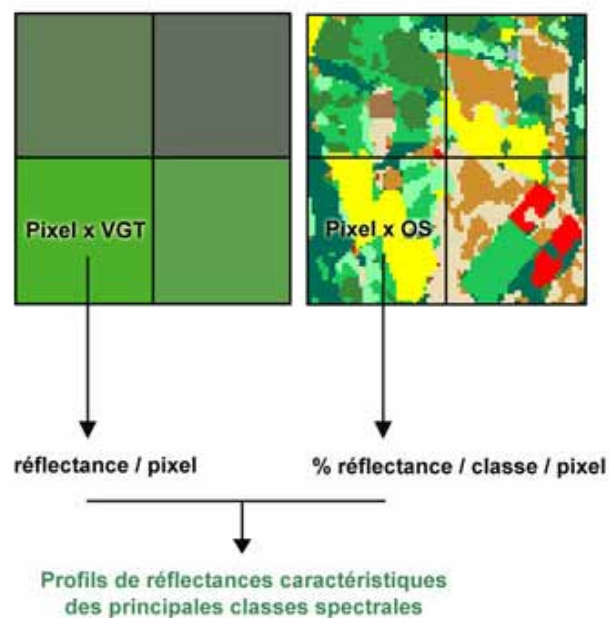
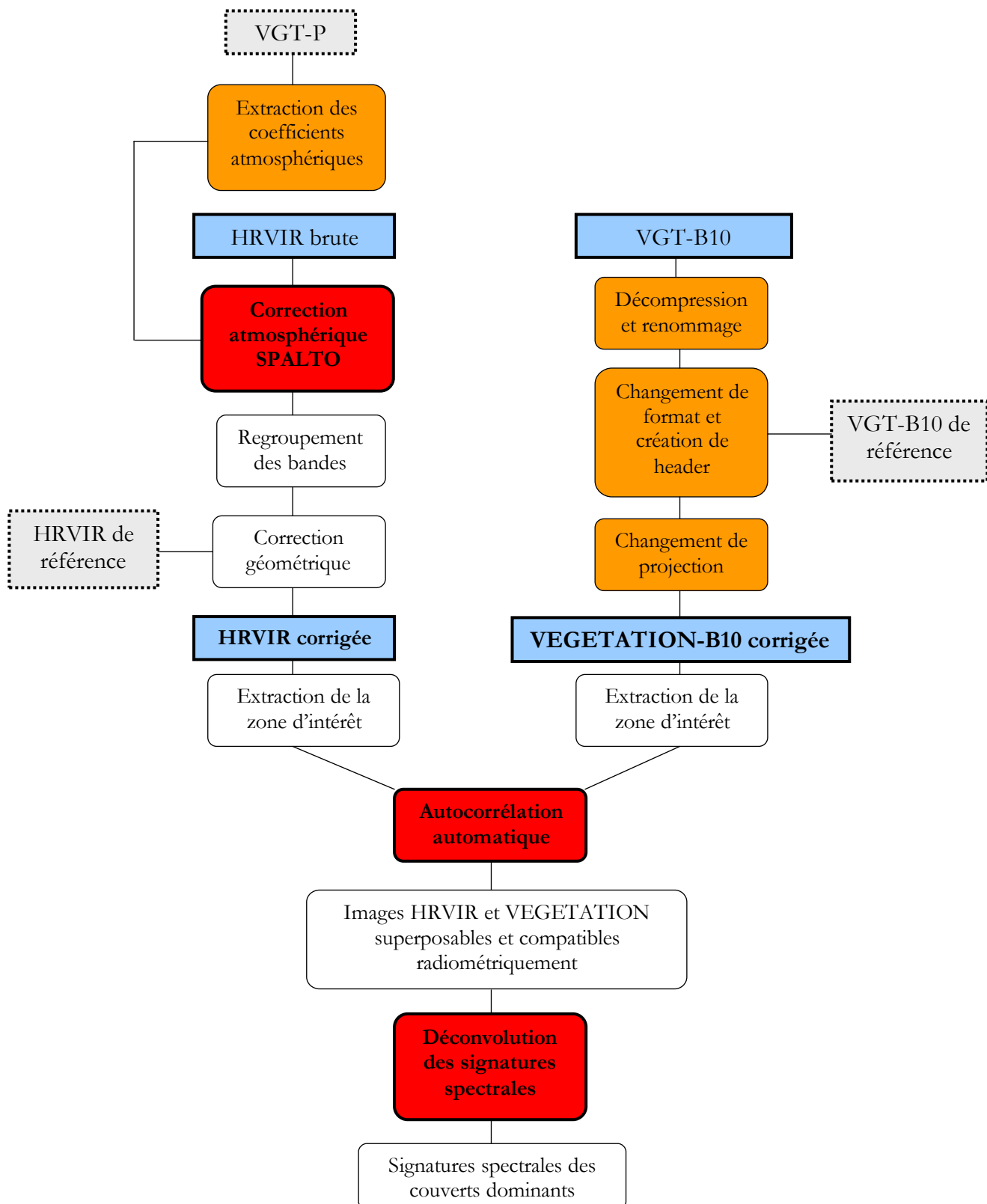


Figure 5 : Principe d'obtention des profils spectraux par déconvolution

d- Schéma synthétique de la chaîne de traitement

Le schéma ci-dessous résume les étapes de la chaîne de traitement réalisée, en représentant en bleu les données brutes et corrigées, en pointillé les images de référence, et en orange les principales étapes de développement algorithmique.



3- Données et outils

a- Système SPOT

Le système d'observation de la terre SPOT conçu par le CNES et exploité par sa filiale, la société Spot Image, est opérationnel depuis février 1986. Il est actuellement composé de 4 satellites en orbite polaire (cf. figure 6, Spot 3 n'étant plus opérationnel) et d'un ensemble performant d'équipements et de systèmes informatiques au sol. Nous travaillerons ici avec les données acquises par SPOT-4.



Figure 6 : Dates de lancement et capteurs embarqués sur les 5 satellites SPOT

Lancé en 1998, SPOT 4 embarque deux instruments de prise de vue, HRVIR et VEGETATION, qui ont été conçus dans un objectif de complémentarité : les bandes spectrales rouge (B2), proche et moyen infrarouge (B3 et MIR) sont identiques, afin de permettre, par superposition des images, des interprétations de données à plusieurs échelles spatiales. Il doit donc ainsi être possible de tirer bénéfice à la fois de la haute fréquence temporelle de VEGETATION (une image mondiale par jour, ayant 1 km de résolution) et de la haute résolution spatiale des HRVIR (20 mètres).

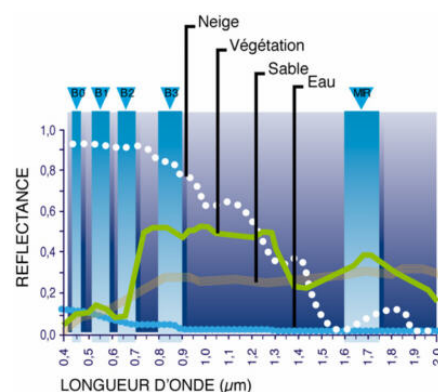


Figure 7 : Longueurs d'onde des bandes spectrales de SPOT 4.
(B0 est présente sur VEGETATION, B1 sur HRVIR)

b- Produits HRVIR et VEGETATION

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques des deux capteurs embarqués sur SPOT 4 :

Instruments	HRVIR 1/2	Végétation 1
Résolution	20 m	1 000 m
Bandes spectrales	B1 : 0.50 - 0.59 μm (vert) B2 : 0.61 - 0.68 μm (rouge) B3 : 0.78 - 0.89 μm (PIR) B4 : 1.58 - 1.75 μm (MIR)	B0 : 0.45 - 0.52 μm (bleu) B2 : 0.61 - 0.68 μm (rouge) B3 : 0.78 - 0.89 μm (PIR) B4 : 1.58 - 1.75 μm (MIR)
Champ de prise de vue	60 km x 60 à 80 km	2 250 km de large
Dynamique de l'image	8 bits	10 bits
Précision de localisation absolue (sans points d'appuis)	< 350 m (RMS)	< 350 m (RMS)
Couverture terrestre globale	26 jours	1 jour
Coalignement HRVIR/VGT	0,3 pixel végétation (300m)	

Tableau 1 : Caractéristiques principales des instruments de SPOT 4 (données Spot Image)

Produits HRVIR :

Il existe de nombreux niveaux de prétraitement des produits de l'instrument haute résolution, du niveau 1A (quasiment brut avec une simple égalisation radiométrique) au niveau Spot View (spatiocarte prête à l'emploi). Le niveau de prétraitement 1B a ici été choisi, car il représente le meilleur compromis pour les corrections à appliquer dans la chaîne de traitement : les données y ont été ré-échantillonnées et des corrections géométriques sont réalisées afin de compenser les effets systématiques (rotation et courbure de la Terre, déformations induites par les angles de prise de vue, etc.).

La scène SPOT se présente sous la forme d'un parallélogramme. Les données auxiliaires (coordonnées du centre de la scène et des quatre coins, modèle de localisation) permettent de localiser l'image au sol avec une précision supérieure à 500 m (erreur quadratique moyenne). En mode multispectral, la hauteur d'une image est d'environ 3200 pixels et sa largeur varie entre 3 200 et 4 250 pixels en fonction de l'angle de prise de vue. Une image couvre une zone de 60 kilomètres du nord au sud et de 60 à 80 kilomètres d'est en ouest. En chaque pixel on dispose d'un compte numérique codé de 0 à 255 qui, à l'aide de coefficients d'étalonnage, peut être relié à la luminance observée par le capteur puis converti en réflectance au sommet de l'atmosphère par normalisation des variations de l'éclairement solaire incident.

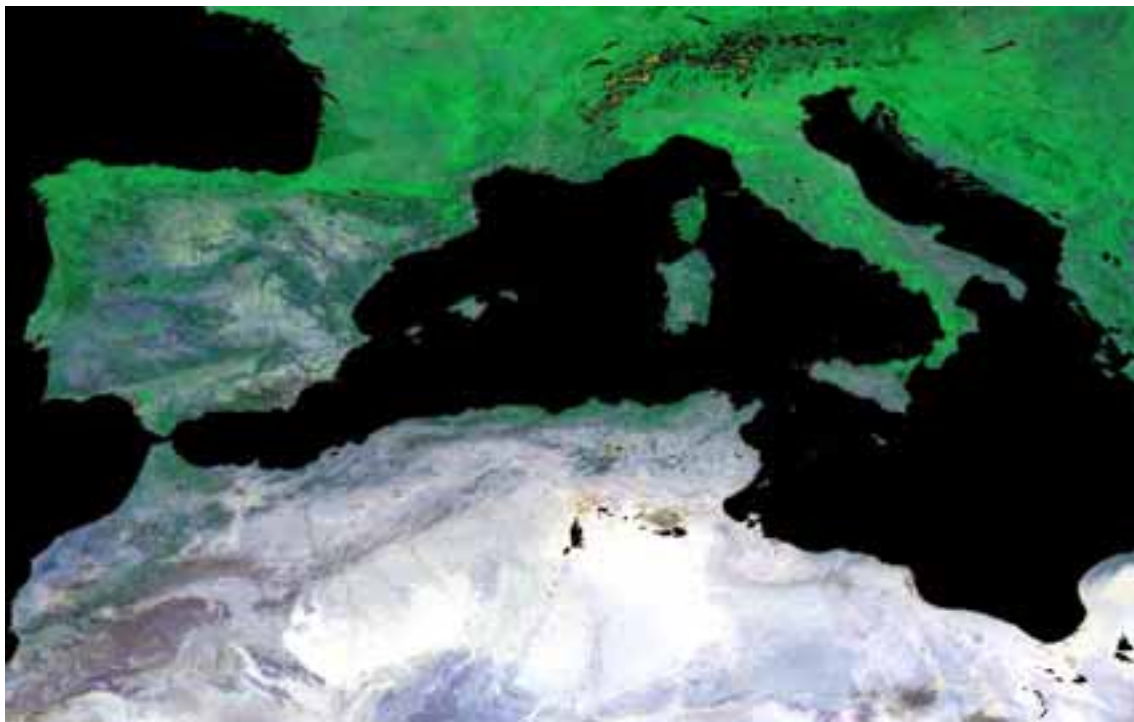
Ces produits sont livrés au format CAP (dérivé de la structure standard CEOS), pour être automatiquement exploitables sous un logiciel de traitement d'image. Il se compose d'une série de cinq fichiers (codés en ASCII) utilisés pour la publication d'images raster, et accompagnés d'informations descriptives. Le fichier image est au format BIL (Band Interleaved by Line), format simple de données raster binaires dans lequel chaque image est organisée par rangées (row-major) et ce, colonne après colonne puis bande après bande (de manière entrelacée).

Produits VEGETATION :

Le capteur VEGETATION est un capteur grand champ, avec une couverture globale quasi-journalière. Sa résolution spatiale est d'environ 1 km. Les images sont livrées au format HDF (Hierarchical Data Format), et sont fournies dans une projection cartographique standardisée (projection plate carrée pour l'exemple

présentée en figure 8). Les données VEGETATION sont déjà géoréférencées et exprimées en grandeur physique (réflectance). Les produits se répartissent en deux catégories :

- Les produits P contiennent les réflectances au sommet de l'atmosphère (TOA) acquises 'instantanément' sur un segment lors d'un passage du satellite. Les effets atmosphériques n'y sont pas corrigés, mais on dispose des paramètres utiles à la correction : contenu en vapeur d'eau (bande WVG), contenu en ozone (bande OG), et contenu en aérosols (bande AG), à une résolution de 100 kms. La fréquence d'acquisition varie en fonction de la latitude, de presque un jour à l'équateur à 3 ou 4 données par jour aux cercles polaires.
- Les produits B10 sont des synthèses décadaires (J1 à 10, J11 à 20 et J21 à la fin du mois) de réflectance de surface, issues de la combinaison de l'ensemble des acquisitions réalisées au cours des dix derniers jours. On obtient des images pour les 4 canaux et le NDVI, et les traitements permettent d'éliminer les nuages et les effets directionnels (inhérents aux variations de la position relative du soleil, de la cible et du capteur). Ces produits sont également corrigés des effets atmosphériques et on ne dispose plus des paramètres utilisés pour la correction.



*Figure 8 : Exemple d'image VEGETATION B-10 sur le bassin Méditerranéen (mai 2002)
(Projection Plate Carrée, format HDF)*

c- Zone d'étude

Elle se situe à l'est de la ville de Marrakech, dans la plaine du Tensift Al Haouz, au Maroc (SPOT KJ 31/286 sur la figure 9). Le climat y est de type méditerranéen chaud et sec. Les précipitations sont faibles et irrégulières. La « saison sèche » dure environ 8 mois de Mai à Novembre. Les cultures sont donc en général irriguées : on y retrouve des céréales, du maraîchage, des plantations d'oliviers, d'agrumes et d'arbres fruitiers. Les cultures étagées (arbres et annuelles) sont nombreuses.

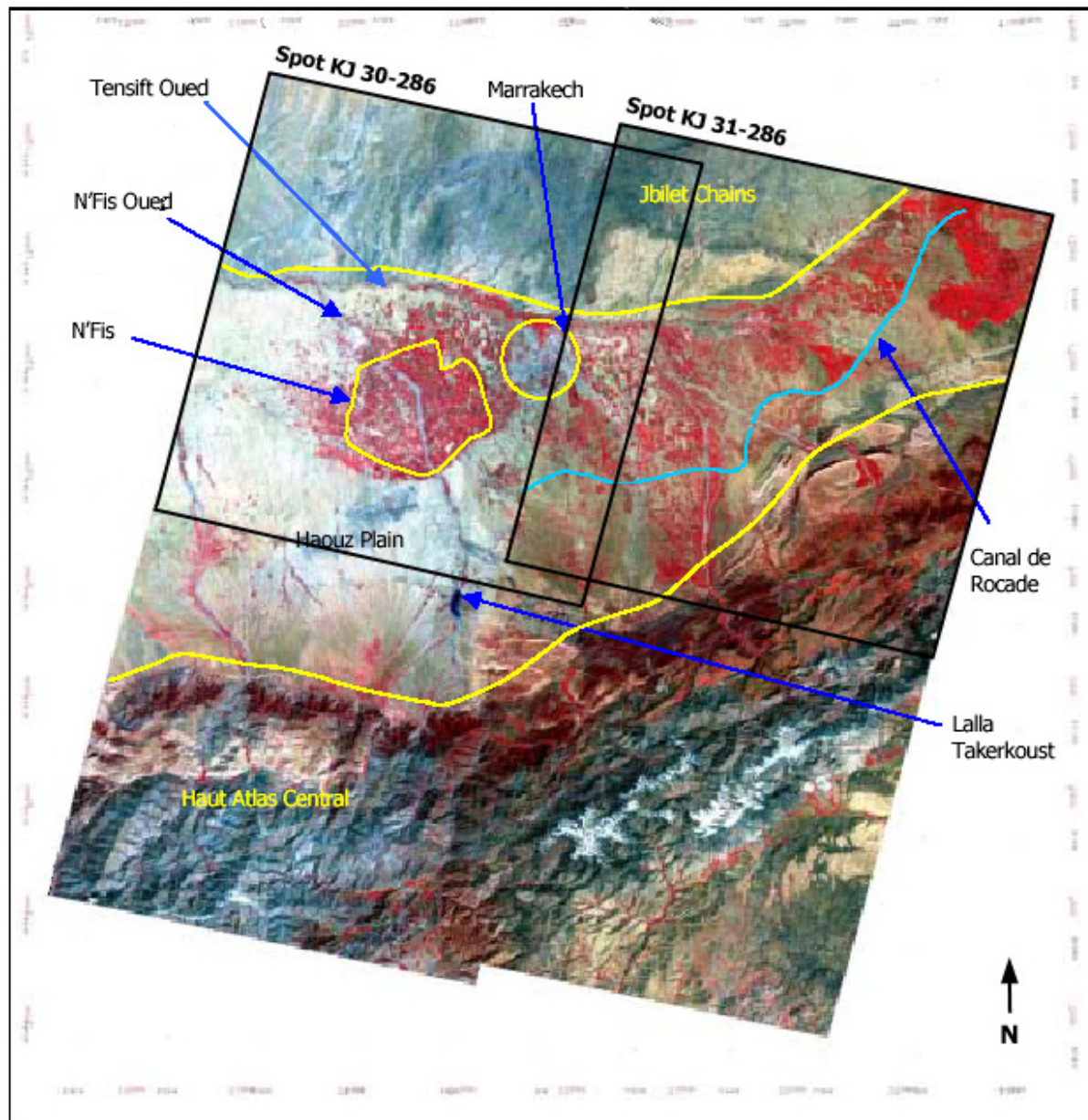


Figure 9 : Mosaïque d'images SPOT 4 HRVIR (mars 2000) de la zone d'étude
Composition XS3, XS2, XS1, projection Lambert Nord Maroc (source Fontannaz D.)

Le tableau ci-dessous regroupe les données HRV et VEGETATION disponibles sur la zone d'étude. Les données HRVIR sont issues d'une programmation auprès de Spot Image pour le projet Sud-Med : acquisition mensuelle d'une image KJ 31-286, de décembre 2001 à juin 2002 (concordance avec les calendriers culturels). Les traitements spécifiques (géoréférencement et corrections) seront traités plus loin. Les données d'occupation du sol nécessaires à la déconvolution et issues de classifications⁶ ont été réalisées à partir de la programmation de ces huit dates. Les quatre classes retenues pour cette étude sont les suivantes : Agrumes, Oliviers, Céréales, Sols nus.

Date	HRVIR 1-2	VGT - P	VGT - B10	Période
			x	21/11/01
			x	01/12/01
07/12/01	x	x	x	11/12/01
			x	21/12/01
02/01/02	x	x	x	01/01/02
			x	11/01/02
23/01/02	x	x	x	21/01/02
			x	01/02/02
08/02/02	x	x	x	11/02/02
			x	21/02/02
			x	01/03/02
15/03/02	x	x	x	11/03/02
			x	21/03/02
			x	01/04/02
			x	11/04/02
26/04/02	x	x	x	21/04/02
			x	01/05/02
12/05/02	x		x	11/05/02
			x	21/05/02
			x	01/06/02
13/06/02	x		x	11/06/02
			x	21/06/02

Tableau 2 : Données HRVIR et VEGETATION disponibles

d- Langages et outils

Les langages qui ont été nécessaires sont nombreux, de par la diversité des codes utilisés :

- le langage IDL (Interactive Data Language, RSI), principalement utilisé pour les chaînes de traitement et pour l'interfaçage avec le logiciel de traitement d'images ENVI (cf. supra);
- le langage C, à travers les codes de correction atmosphériques (codes SMAC et SPALTO), ainsi que pour les codes de déconvolution ;
- le langage Fortran, avec lequel est codé l'algorithme de déconvolution de Faivre ;
- langage de commande shell DOS, pour l'automatisation des étapes de décompression et de renommage des données brutes.

⁶ François P., 2002.

Les développements ont été réalisés sous environnement Windows (NT4 service Pack 6), avec les compilateurs suivants :

- IDL Version 5.5, (Win32 x86), 2001, Research Systems, Inc., pour les codes en IDL ;
- Visual C++ Standard 6.0, Microsoft, pour les codes en langage C ;
- Digital Visual Fortran, Microsoft, pour les codes en langage Fortran.

Les traitements d'images ont été réalisés à partir du logiciel ENVI (RSI) dans sa version 3.5.

Le langage IDL :

C'est un langage scientifique de 4^{ème} génération à partir duquel a été développé le logiciel de traitement d'image ENVI, sous sa version 5.5. Langage de type **matriciel** (de la famille MATLAB), il permet le développement d'applications de traitement et de visualisation de gros jeux de données scientifiques et techniques. L'approche y est centrée sur les **TABLEAUX**, et permet une programmation procédurale ou une programmation objet. Il dispose d'un environnement de développement composé d'un éditeur de texte chromacodé (procédures et fonctions utilisateur et système, chaînes, nombres, mots clés et commentaires), d'une ligne de commande, d'une fenêtre d'état des variables, d'une fenêtre de sortie, d'un débogueur complet, d'un organisateur de projet et d'un profiler.

Ses principales caractéristiques résident dans :

- une déclaration dynamique des types ;
- un accès aux données par des procédures de bas niveau (open, read, write...) ou par des interfaces (import_ascii, import_hdf...), utiles dans notre cas pour la prise en compte des différents formats ;
- le développement d'applications en mode programmatique (widgets de base, composés, menus contextuels...) ou en mode interactif avec le GUI Builder (mode Drag & Drop, développement IHM progressif). Le mode programmatique a été ici privilégié car il permet de mieux contrôler les passages de paramètres et la gestion des événements ;
- une ouverture vers d'autres langages (C, C++, Fortran) par des méthodes de liens (cf. supra).

L'intérêt de l'utilisation de ce langage est double. D'une part les performances sont très intéressantes en comparaison avec d'autres langages matriciels, notamment sur des traitements en boucle de matrices. D'autre part, les routines implémentées dans ENVI sont réutilisables (ENVI...). IDL permet ainsi un interfaçage très efficace, soit en mode interactif, soit en mode Batch (ligne de commande), en chargeant et compilant les routines ENVI par les deux lignes suivantes :

```
ENVI, /RESTORE_BASE_SAVE_FILES
ENVI_INIT, /BATCH_MODE
```

Toutes ces caractéristiques ont été mises à profit pour le développement de la chaîne de traitement décrite dans le présent rapport. En guise d'exemple, l'annexe 3 présente un listing réduit de programme IDL, celui de l'autocorrélation automatique.

II - DEVELOPPEMENT ALGORITHMIQUE

1- Préparation du jeu de données

a- Décompression et renommage

Les produits VEGETATION étant livrés sous forme compressée et sous des noms identiques, il est nécessaire d'automatiser la décompression et le renommage de ces fichiers afin de pouvoir les lancer en boucle et avec comme identificateur des dates les chaînes de traitement. Un zip contient selon les produits P ou B10 entre 20 et 25 fichiers, et il ne sera ici extrait que les 4 bandes spectrales B0, B2, B3 et MIR, en les renommant sous la forme VEGETATION_BDC⁷_bande_date.extension, ainsi que le fichier de volume LOG_FILE. Le principe de l'opération repose sur l'utilisation de l'application UNZIP.exe. La récupération séquentielle de la date s'opère à travers l'appel du fichier *unzip_all.bat*, contenant la liste des dates à traiter, et qui lance le fichier *unzip_one.bat* avec en paramètre la date récupérée dans la variable '%1'. Le renommage du fichier zippé permet de récupérer le fichier initial sans modification. Un fichier texte est constitué (test-zip.txt) pour vérifier le bon déroulement des opérations par redirections des sorties des principales commandes ('>>')

unzip_all.bat :

```
unzip_one.bat
20010221
20010301
20010311
20010321
20010401
20010411...
```

unzip_one.bat :

```
: encore
  if "%1"==" " goto fin
    echo %1
    ren VGT_BDC_%1_SM.ZIP TMP.ZIP
    echo %1 >> test_zip.txt
    unzip.exe TMP.ZIP >> test_zip.txt
    ren TMP.ZIP VGT_BDC_%1_SM.ZIP
    mkdir bdc
    copy 0001\0001_log.txt bdc\VGT_BDC_log_%1.txt
    copy 0001\0001_b0.hdf bdc\VGT_BDC_b0_%1.hdf
    copy 0001\0001_b2.hdf bdc\VGT_BDC_b2_%1.hdf
    copy 0001\0001_b3.hdf bdc\VGT_BDC_b3_%1.hdf
    copy 0001\0001_mir.hdf bdc\VGT_BDC_mi_%1.hdf
    del Phys_vol.txt
    del /Q 0001
    shift
    goto encore
: fin
cd ..
echo FIN
```

b- Corrections géométriques et extraction HRVIR

Cette étape correspond à des traitements effectués directement sous ENVI, et ne fait pas intervenir de développement en IDL. En effet, ces corrections impliquent des traitements visuels qui ne peuvent être programmés : recentrage des « losanges » corrigés en géométrie par des matrices complètes (élimination

⁷ Bi-Directional Compositing, méthode de traitement des données VGT B10.

des coins), extraction des coordonnées optimales (coins Haut-Gauche et Bas-Droit tel que tous les pixels de l'image contiennent réellement de la donnée radiométrique) pour la superposition avec les VEGETATION. Pour chaque image HRV, nous avons effectué les étapes de traitement suivantes :

- Choix d'une taille d'image de base (3741*3597 pixels) ;
- Regroupement des 4 bandes TOA et SURFACE issues de SPALTO ;
- Sélection de l'image de base géoréférencée, de l'image à corriger, et des fichiers de points d'amer (*.pts) ;
- Géoréférencement en Lambert Nord Maroc, datum Merchich ;
- Extraction des zones centrales des losanges pour l'autocorrélation.

Au final, on constate de légères pertes sur les bords, mais hors des zones d'intérêts (seulement sur les piémonts et les zones non cultivées). De plus, la superposition multodate est alors rendue possible.

c- Ecriture VEGETATION au format ENVI et création de header

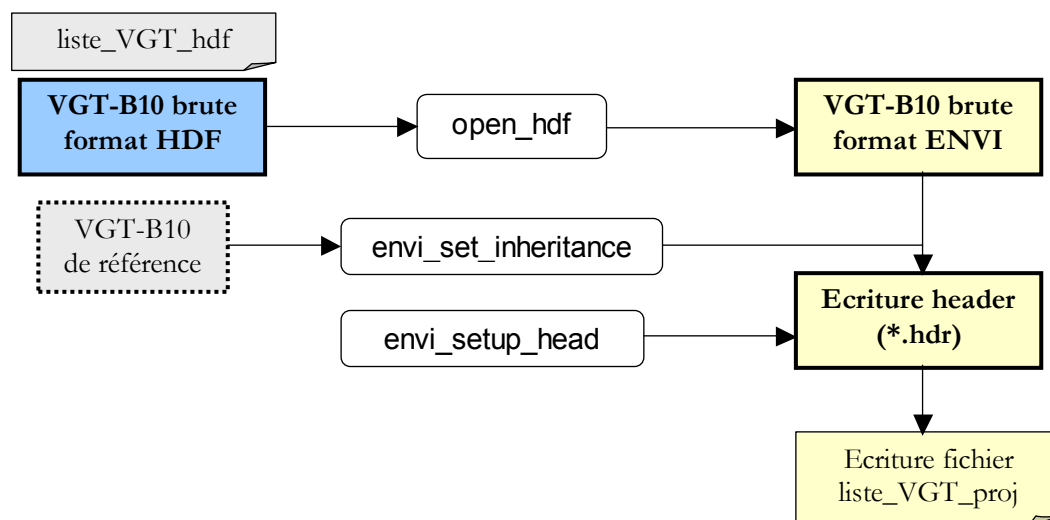
Cette étape constitue une « mise à niveau » des données brutes VEGETATION, pour leur intégration dans la chaîne de traitement, et se décompose comme suit :

1- Ecriture au format ENVI :

Le format HDF (Hierarchical Data Format) dans lequel sont fournies les 4 bandes VEGETATION est un format scientifique qui ne contient pas seulement les données brutes mais possède déjà un header dans un format interne. Or les procédures de récupération de matrices d'IDL gèrent mal cet en-tête. Il n'est donc pas possible d'ouvrir les fichiers VEGETATION *.hdf avec les routines classiques. Il a été nécessaire d'ouvrir chacun de ces fichiers avec la commande `envi_open_data_file`, `/hdf_sd`, afin de récupérer la matrice de données radiométriques (commande `envi_get_data`), puis de réécrire cette matrice dans un fichier brut sous forme d'image raster (commande `writeu`). Une boucle a été implémentée pour automatiser ces traitements sur séries de données VEGETATION.

2- Création de header :

La première solution envisagée consistait à créer le header de toute pièce, ce qui était propre et rapide, mais constituait une limite à la portabilité (valable uniquement pour la projection et le format précis de nos données). Nous avons donc procédé à la récupération des paramètres d'une image VEGETATION de référence, possédant déjà un header, par **héritage**. Cette solution est plus transparente pour l'utilisateur, car elle permet de créer un header à partir de n'importe quelle image de référence. En entrant en paramètre dans l'interface la liste des images VEGETATION à convertir, on obtient en sortie une liste d'images possédant un header au format ENVI, et prêtes à être traitées dans l'étape suivante, décrite au § II 1-c.



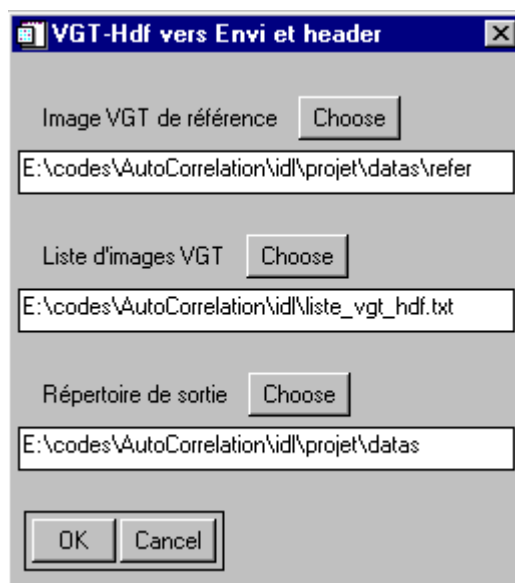
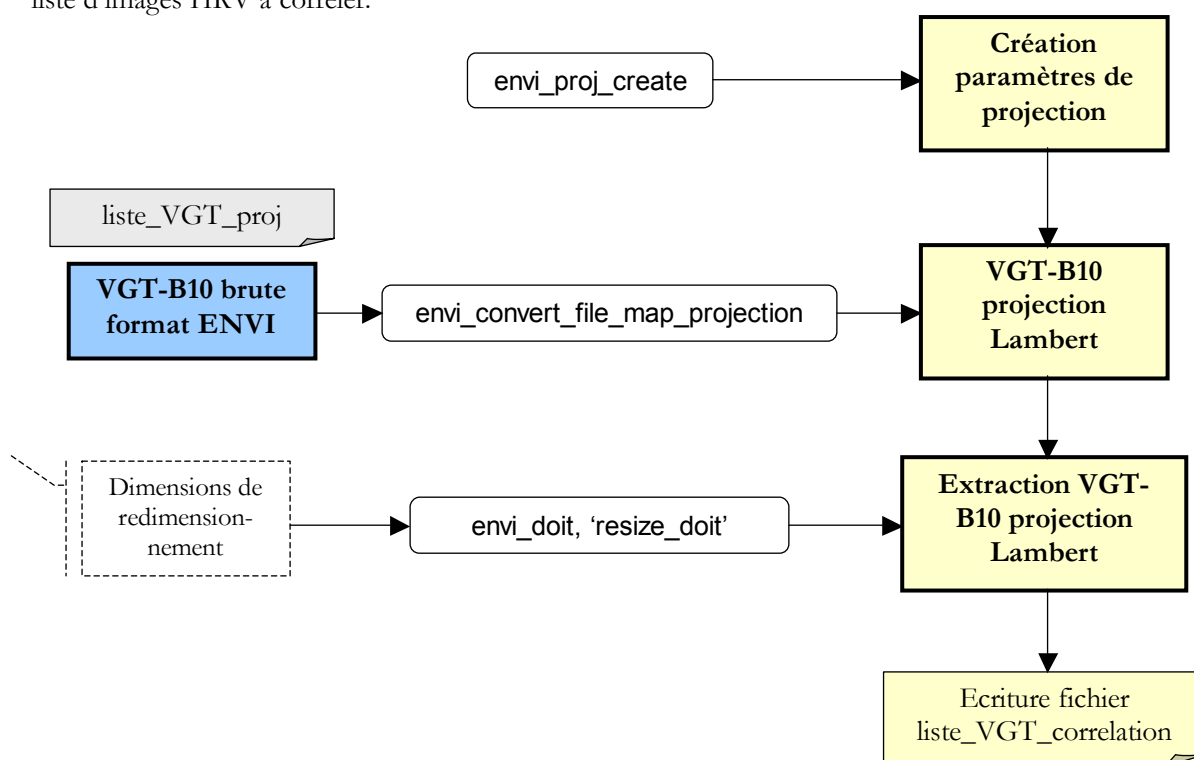


Figure 10 : Interface d'écriture VEGETATION au format ENVI et création de header

d- Changement de projection et recentrage (extraction) des VEGETATION

Les produits B10 et P n'étant pas fournis dans la même projection que les images HRVIR (projection plate carrée à la place de Lambert 1 nord Maroc), il est nécessaire d'opérer un changement de projection, indispensable à la suite des traitements d'autocorrélation et de superposition. Dans un premier temps, on crée de toute pièce les paramètres de projection (`envi_proj_create`), et dans un second temps, par la routine (`envi_convert_file_map_projection`), on opère le changement de projection.

D'autre part, l'algorithme d'autocorrélation étant assez lent, il est préférable d'extraire la zone minimum de l'image VEGETATION dans laquelle sera contenue l'image HRVIR correspondante (routine `envi_doit`, '`resize_doit`'), afin de minimiser le temps de traitement. Les dimensions de redimensionnement ont été extraites des offset (décalage par rapport à l'image initiale) des header de la liste d'images HRV à corrélérer.



L'interface (figure 11 ci-dessous) a été développée de manière à avoir en entrée le fichier contenant la liste d'images VEGETATION au format ENVI issu du traitement précédent, et d'obtenir en sortie une liste d'images VEGETATION contenue dans le fichier texte liste_VGT_correlation, et prête à être prise en paramètre dans la procédure d'autocorrélation décrite plus loin.

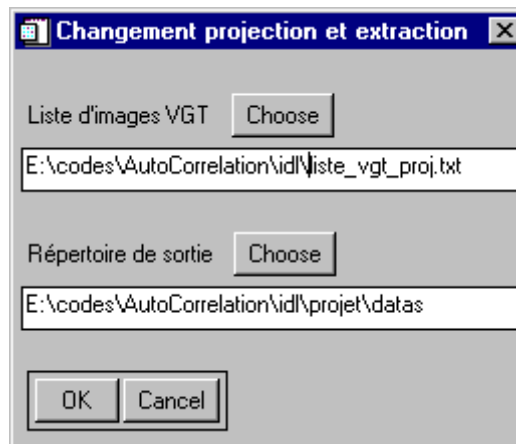


Figure 11 : Interface de changement de projection et recentrage VEGETATION

2- Correction des effets atmosphériques

a- Extraction des coefficients atmosphériques

Les produits VEGETATION-P sont les seuls à être fournis avec trois bandes particulières, d'une résolution de 100*100 km, codées sur 8 bits, et renseignant sur l'état de l'atmosphère au moment de la prise de vue. Ces données sont issues de modèles de circulation générale pour H₂O et de climatologies pour les aérosols et O₃ (un exemple est donné en figure 12). Il s'agit des bandes WVG (Water Vapor grid, contenu en vapeur d'eau, en g/cm²), OG (Ozone Grid, teneur en ozone, en atm/cm), et AG (Tropospheric Aerosol Grid, teneur en aérosol, sans unité).

Ces trois bandes permettent d'extraire pour chaque date HRVIR correspondante la valeur des trois coefficients nécessaires au paramétrage de l'algorithme de correction atmosphérique SPALTO.

Les étapes nécessaires à l'extraction de ces coefficients sont les suivantes :

- géoréférencement du produit VEGETATION-P : bande spectrales 1 x 1 km, et des bandes WVG (Water Vapor grid), OG (Ozone Grid) et AG (Tropospheric Aerosol Grid) 100 x 100 km ;
- repérage de la zone couverte par HRVIR (KJ 31/286, correspondant à la zone noire sur la figure 12) et calcul des pixels VEGETATION 100 km² correspondant (ici deux pixels, pointillés rouges) ;
- extraction des statistiques sur ces pixels, export pour le calcul de la moyenne, et injection dans le fichier de paramètre de SPALTO.

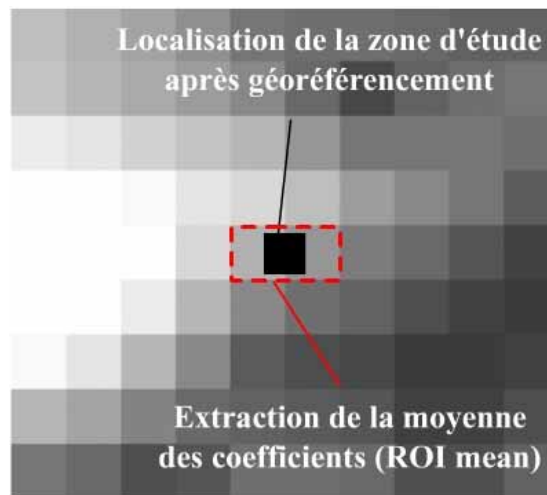


Figure 12 : Extraction des coefficients atmosphériques d'une matrice WV G VEGETATION-P (bande WV G du 07/12/2001)

on obtient pour la zone #1 extraite :

Band	Min	Max	Mean	Stdev
1	21	49	34.928571	8.241212

Les valeurs des coefficients atmosphériques pour le paramétrage de la correction atmosphérique de la série d'images Spot HRVIR sont détaillées en annexe 1.

b- Modification et adaptation du code SPALTO

Le programme SPALTO utilisé, codé en langage C, fonctionnait pour des images HRVIR SPOT-4. Afin de répondre aux objectifs fixés, trois modifications significatives ont été apportées au programme initial.

Tout d'abord, afin de rendre possible l'interfaçage avec IDL, les procédures de lecture des fichiers de paramètres ont dû être revues afin de renseigner directement les chemins complets des fichiers utilisés (au nombre de 6), selon l'exemple détaillé ci-dessous :

```

Ex : spalto_path[120],spaltini_name[150],spaltcoef_name[150]
i.  fichier_parametre.txt >> 8 paramètres (3 à spécifier)
ii. spalto.ini >> 3 paramètres (2 à spécifier)
iii. vold.dat >> 5 paramètres
iv.  lead.dat >> 33 paramètres
v.   fichier_ak.txt >> 3 ou 4 paramètres selon le satellite
vi.  coef_SPOT4xs3hrv2_CONT.dat >> 48 paramètres
  
```

Ensuite, disposant d'une image prise par le satellite Spot-2, et désirant étendre la correction à d'autres formats (les images prises par Spot 2 ne contiennent que 3 bandes), il a été nécessaire de modifier les procédures de lecture et d'étalonnage. Les modifications ont correctement fonctionné, même si les résultats obtenus pour la correction ont montré certaines incohérences, que l'on détaillera en § III 1.

Enfin, au même titre que les coefficients atmosphériques, nous avons permis le passage de la pression atmosphérique en paramètre, afin de pouvoir tenir compte de l'altitude moyenne de la zone où l'on effectue la correction sans avoir à modifier le code source du programme SPALTO.

c- Interfaçage avec IDL et ENVI

L'objectif final est ici de fournir à tout utilisateur d'ENVI en mode interactif une interface lui permettant d'obtenir une correction de surface d'images SPOT 4. Nous avons testé ici pour les besoins de l'appel du

code C de Spalto trois techniques différentes d'appel de code externe, disponibles sous une plate forme Windows :

- **LINKIMAGE** : cet appel ajoute une routine au système interne de table des routines d'IDL, en rendant la routine externe indiscernable des routines incorporées, mais ne peut être utilisé avec succès qu'en cas de développement parallèle d'applications. Il serait donc nécessaire de rendre complètement transparent les liaisons entre IDL et les procédures de SPALTO, ce qui n'a pu être réalisé dans le temps consacré à ce stage.
- **CALL_EXTERNAL** : le principe est de créer une librairie sous forme de DLL (Dynamic Link Library), afin de pouvoir ensuite l'appeler l'IDL avec ses paramètres :
`Result = call_external (image, entry, p1, p2, pn)`, où `image` est le nom de la DLL, `entry` le point d'entrée de la librairie et `p` les différents paramètres. Le programme en C doit obligatoirement être sous la forme : `return type fonction (int argc, void *agrgv[])`
 La création de la DLL peut s'effectuer à partir de tout compilateur C ou bien à travers la routine **MAKE_DLL** d'IDL. Cette procédure devait être initialement utilisée, mais le passage de la chaîne de caractères en paramètres et la compilation de la DLL n'as pas fonctionné malgré l'aide des ingénieurs RSI. La décomposition radicale suivante du programme Spalto, trop coûteuse en temps pour pouvoir être réaliser, aurait dû être appliquée :

```
lecture et stockage des données image dans une matrice 2 dimensions
(readu)
lecture et stockage des coefficients, atmosphériques et d'étalonnage
(101 paramètres)
    CALL_EXTERNAL (matrice, procédure_1.dll, paramètres)
    CALL_EXTERNAL (matrice, procédure_n.dll, paramètres)
récupération de la matrice corrigée
écriture dans des fichiers image (writeu)
```

- **SPAWN**, \$: cette routine appelle sous forme d'une ligne de commande un programme préalablement compilé sous forme d'exécutable (ici fichier `spalto.exe`). C'est cette technique qui a été retenue, et les modifications du code source ont été opérées en conséquence. La difficulté a résidé dans la récupération du fichier de paramètre à spécifier dans l'appel de **SPAWN**. Le fichier est réécrit entièrement, de la manière suivante :

```
*****ECRITURE DU FICHIER DE PARAMETRES*****

fich = result.spa+'\\parametres.txt' ; création du fichier
openw, unit, fich, /GET_LUN ; ouverture en écriture
printf, unit, result.spa
printf, unit, result.inf+'\\VOLD_01.DAT'
printf, unit, result.inf+'\\LEAD_01.DAT'
printf, unit, result.inf+'\\IMAG_01.DAT'
printf, unit, result.outf+'\\image_corrigee'
printf, unit, result.outf+'\\donnee.txt'
printf, unit, STRTRIM((float(result.Puh2o)), 1)
printf, unit, STRTRIM((float(result.Puo3)), 1)
printf, unit, STRTRIM((float(result.Ptaup550)), 1)
printf, unit, STRTRIM((uint(result.Ppression)), 1)
FREE_LUN, unit

*****LANCEMENT DE SPALTO*****

spalto = result.spa+'\\spalto' ; récupération de l'exécutable
a= string(spalto+' '+ fich)
SPAWN, a ; lancement du traitement
```

Le produit final se présente sous la forme d'un pack Spalto, contenant les fichiers source et les indications nécessaires à l'installation et la modification du menu.

Parallèlement, l'interface ENVI de SPALTO a été développée afin de récupérer tous les paramètres nécessaires : répertoires d'entrée (pour les fichiers image et header) et de sortie (pour l'écriture des images

corrigées), ainsi que pour la récupération des coefficients atmosphériques et de la pression⁸. Une aide directe a aussi été implémentée et en présente les grandes lignes

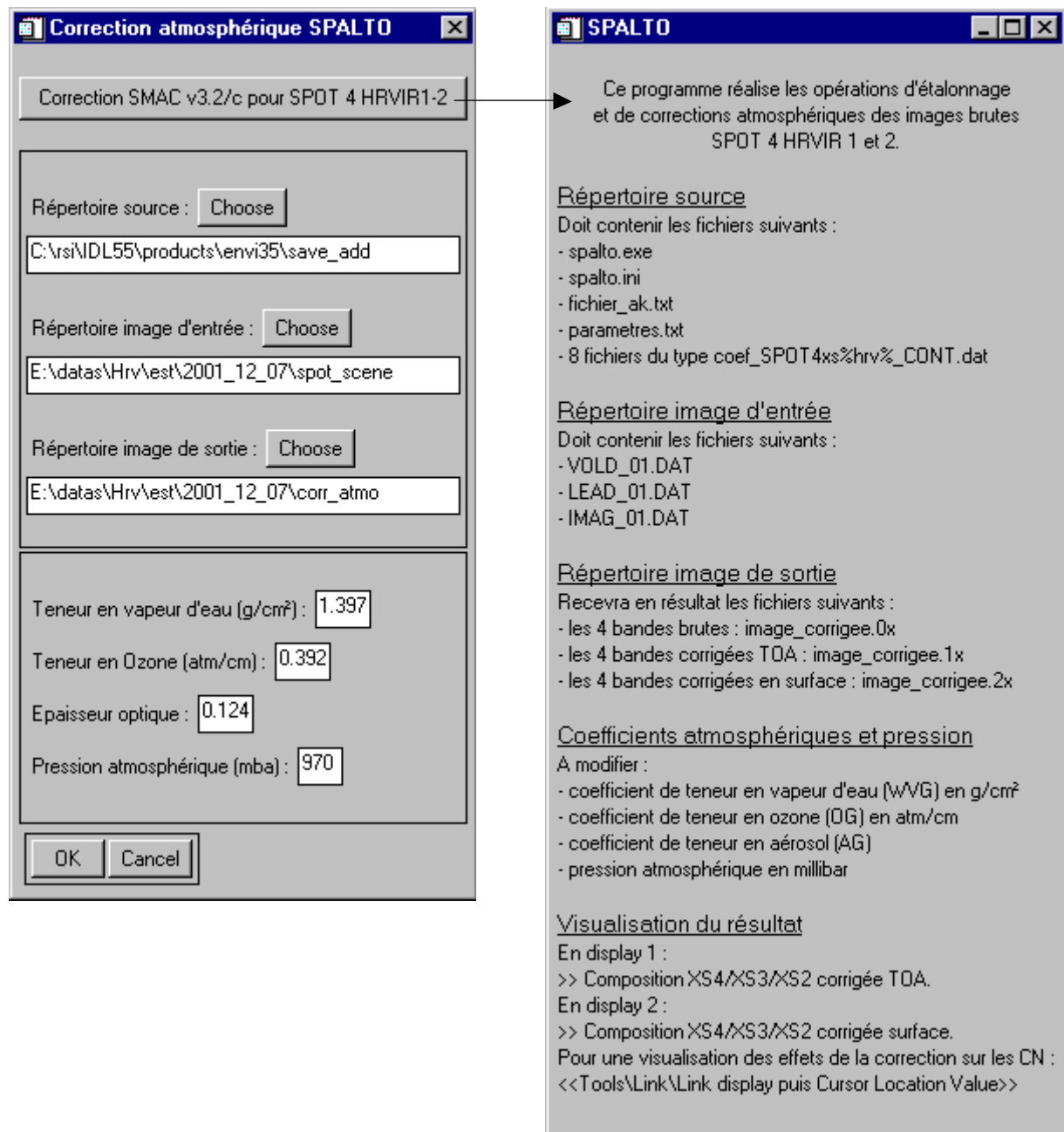


Figure 13 : Interface graphique de Spalto sous ENVI

Modification du menu d'ENVI :

A chaque démarrage d'une session ENVI, les menus sont construits sur la base des deux fichiers `envi.men` pour le menu principal et `display.men` pour le menu des fenêtres d'affichage. Chaque nouveau bouton est défini par une ligne d'entrée dans l'un de ces fichiers. Nous présentons ci-dessous l'extrait du fichier `envi.men` qui permet l'appel de SPALTO à l'aide des menus d'ENVI. Cet appel a été ajouté dans le sous-menu déroulant « spectral ».

⁸ Valeur de la pression atmosphérique récupérée sur des Modèles Numériques de pression (en atm/cm)

```

0 {Spectral}
1 {Spectral Libraries}
  2 {Spectral Library Viewer} {spec lib view} {envi_menu_event}
...
1 {FLAASH} {flaash} {envi_menu_event}
1 {SPALTO} {not used} {param inf}
1 {Build 3D Cube} {cube 3d} {envi_menu_event} {separator}

```

Dans la ligne correspondant à l'appel de SPALTO (en gras ci-dessus) :

- 1 désigne le niveau hiérarchique du bouton ;
- {SPALTO} précise le texte qui apparaîtra sur le bouton du menu ;
- {not used} est une valeur utilisateur pour le bouton, ici non utilisé car n'impliquant pas d'événement (une seule procédure) ;
- {param_inf} indique le nom de la procédure à appeler au sein du programme.

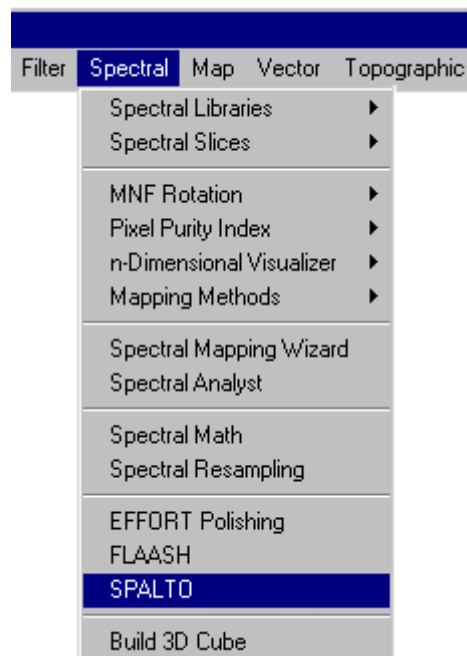


Figure 14 : Menu ENVI Spectral avec SPALTO.

3- Autocorrélation automatique

a- Boucle de corrélation

A chaque itération, l'image HRV est dégradée à l'échelle VEGETATION, c'est à dire qu'on réduit d'un facteur 50 la matrice HRV (50*50=2500 pixels sont moyennés en un pixel). L'extraction de la matrice VEGETATION correspondante s'effectue alors, afin de pouvoir finalement corréler les deux matrices. Les boucles de corrélation en langage de description se présentent de la manière suivante :

```
Rmax = -1
pour chaque pixel HRV ligne origine de la dégradation
pour chaque pixel HRV colonne origine de la dégradation

    DEGRADATION HRV

    pour chaque pixel VGT ligne origine de la superposition
    pour chaque pixel VGT colonne origine de la superposition

        EXTRACTION de la matrice VGT correspondant à la zone
        couverte par la HRV dégradée
        CORRELATION (vecteur VGT, vecteur HRV)
        TEST : si R > Rmax
            R := Rmax
    finpour
finpour
finpour
finpour
```

Il est intéressant de noter ici les solutions envisagées pour le codage de la phase extraction-dégradation de la matrice HRV à corréler, afin de souligner l'intérêt de l'interfaçage entre la programmation IDL et ENVI, par l'utilisation de routines déjà implémentées et optimisées, mais aussi la difficulté de trouver les routines adéquates ainsi que la « jeunesse » et les bug encore nombreux de la programmation ENVI. Nous présentons à ce titre les trois solutions que nous avons exploré pour la boucle de corrélation :

Variables globales :
 ns_lu, nl_lu : nombre de lignes et de colonnes (initialisé pour chaque image)

Solution 1 :

Cette solution, dont le code est donné ci-dessous, consiste à effectuer l'échantillonnage au moment de la lecture de la donnée. Elle fait intervenir la routine ENVI_GET_DATA avec le mot clef INTERP qui par la méthode 'pixel aggregate' (n°3) doit permettre d'extraire à chaque boucle la matrice HRV en faisant la moyenne des 2500 pixels (un pixel VEGETATION = 50 x 50 pixels HRV). Or il s'est avéré, après de nombreux échanges avec le support technique de RSI que pour un facteur de redimensionnement trop petit (1/50= 0.02 dans le cas présent) la moyenne ne se faisait pas et que le rééchantillonnage passait à la méthode du plus proche voisin. Grâce à cet échange, ce problème devrait être corrigé dans la prochaine version du logiciel.

```
factor = 0,02 ; facteur de rééchantillonnage
dims_hrv=[-1, s_hrv, s_hrv+ns_lu-1, l_hrv, l_hrv+nl_lu-1]
matr_hrv[*,*]=ENVI_GET_DATA(fid=fid_hrv, dims=dims_hrv, pos=0, XFACTOR=factor, $
YFACTOR=factor, interp=3)
```

Solution 2 :

Il s'agit ici d'implémenter de toute pièce la récupération de la matrice et sa réduction par moyennage, par le rajout d'une boucle FOR et le remplissage séquentiel de la matrice par des moyennes (MEAN) successives. Cependant ce codage (ci-dessous) est très peu performant et a été abandonné au profit de la routine REBIN.

```
Fact = 50 ; nombre de pixels lignes et colonnes à moyenner
dims_hrv=[-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
FOR i=0, ns_lu-1 DO BEGIN
```

```

FOR j=0, nl_lu-1 DO BEGIN
temp_hrv[0,0]=ENVI_GET_DATA(fid=fid_hrv, dims=dims_hrv, pos=0)
matr_hrv[i,j]=MEAN(temp_hrv[(s_hrv+i*fact):(s_hrv+(i+1)*fact-1)],$
(l_hrv+j*fact):(l_hrv+(j+1)*fact-1))

```

Solution 3 :

Finalement (voir séquence de code ci-dessous), on a procédé à la récupération de la totalité de la matrice HRV (envi-get-data sans rééchantillonnage), puis à sa réduction à l'aide de la routine IDL REBIN. Il s'est en effet avéré que cette procédure, lorsqu'elle n'est pas utilisée avec le mot-clé /SAMPLE, procédait à un moyennage lors du rééchantillonnage dans la dernière version d'IDL utilisée. C'est donc cette solution, bien que moins performante que la première, qui a été retenue :

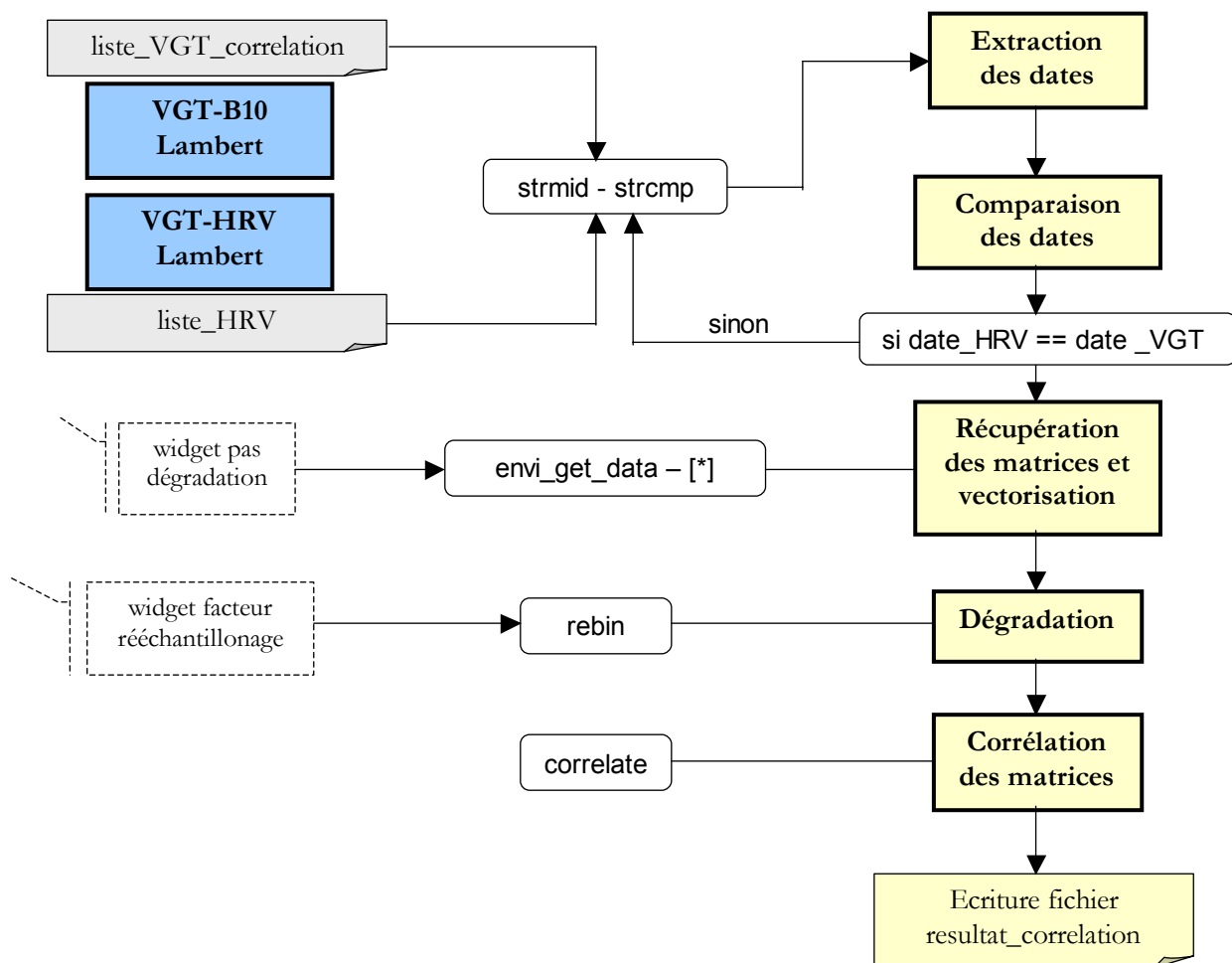
```

sreb=ns_lu/fact
lreb=nl_lu/fact
dims_hrv=[-1, s_hrv, s_hrv+ns_lu-1, l_hrv, l_hrv+nl_lu-1]
temp_hrv=ENVI_GET_DATA(fid=fid_hrv, dims=dims_hrv, pos=0)
matr_hrv=REBIN(temp_hrv, sreb, lreb)

```

b- Schéma de l'algorithme

Cet algorithme fonctionne avec en entrée des couples d'images HRV/VEGETATION, préalablement mis dans la même projection (ici Lambert Nord Maroc). En entrée, il faut fournir les deux listes d'images HRV et VEGETATION (issue des traitements précédents), ce qui permet de récupérer dans la première la date de l'image HRV pour ensuite pouvoir rechercher la date de la décade la plus proche. Les pas de dégradation et de rééchantillonnage sont ensuite passés en paramètre à travers l'interface graphique. On obtient en sortie un fichier résultat_correlation (voir plus loin). L'annexe 3 présente dans ses grandes lignes l'algorithme codé en IDL.



c- Interfaçage et sorties

L'interface du programme d'autocorrélation a été développé de façon à récupérer les deux listes nécessaires aux ouvertures de fichiers et à la récupération des dates pour les corrélations croisées. Les deux facteurs pas de dégradation (variant selon la précision de coalignement souhaitée) et rééchantillonnage (variant selon le rapport entre les résolutions des images à corrélérer), passés en paramètres dans le programme, sont récupérés par la suite.

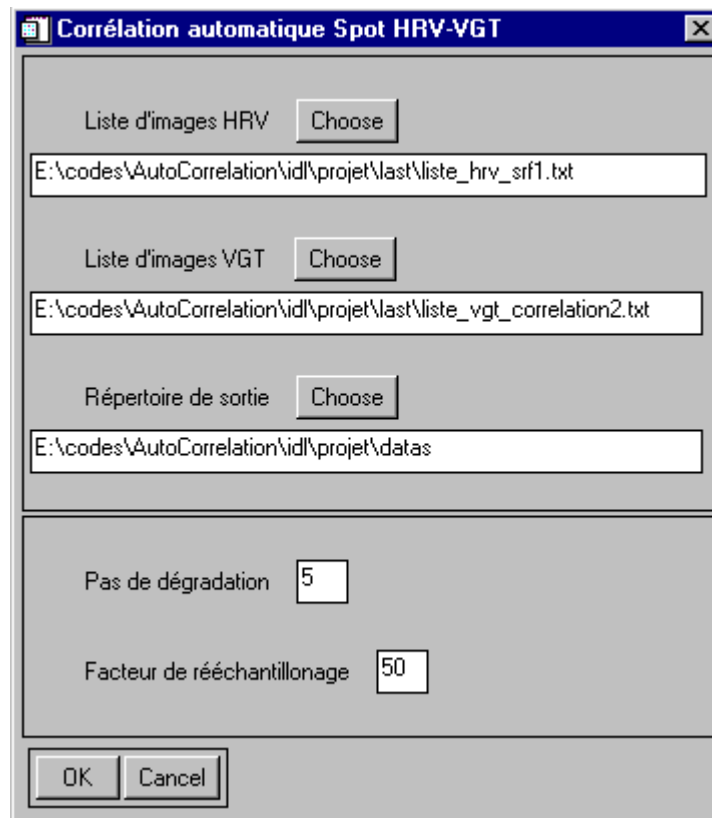


Figure 15 : Interface ENVI du programme d'autocorrélation HRV/VEGETATION

En sortie, le résultat de l'autocorrélation est traité de la manière suivante :

- Application de fonctions de calculs de droites de régression (CURVEFIT) pour bénéficier du coefficient R^2 et de la pente ;
- Ecriture séquentielle dans un fichier (resultat_correlation) des résultats des coefficients de corrélation, des coordonnées finales de superposition, de la pente de la droite de régression et de sa coordonnée à l'origine.

4- Déconvolution de séries temporelles

a- Adaptation des codes

L'algorithme de déconvolution utilisé a été développé par R. Faivre en langage Fortran. Afin d'être intégré à des applications spécifiques, ce code a été interfacé à des chaînes de traitement codées en langage C. Développés à la base pour la production de cartes de LAI et de FPAR⁹, les codes qui ont servi à cette étude ont été modifiés et adaptés aux nouveaux objectifs : seul le cas où la déconvolution intervenait (résolution différente de 1) a été pris en compte, et les procédures d'E/S ont été revues afin d'obtenir les réflectances estimées des classes. Cependant, de par l'absence de certaines routines (blocs de matrices notamment), il n'a pas été possible d'aboutir aux résultats finaux. Les perspectives de ces traitements seront donc exposées plus loin.

Au niveau de la préparation des données, les classes de la carte d'occupation du sol ont été agrégées afin de ne pas dépasser le nombre limite d'end-membres, et pour aboutir aux quatre classes retenues. De plus, afin de pouvoir être intégrée à l'algorithme, la carte d'occupation du sol doit être superposable aux cartes de réflectance VEGETATION. Les origines HRV/OS et VEGETATION de superposition passés en paramètres dans la fonction d'extraction des blocs de réflectance de la matrice VEGETATION proviennent des résultats de l'autocorrélation automatique décrite plus haut.

b- Algorithme d'estimation des réflectances

La compréhension et l'adaptation des codes initiaux a abouti à la finalisation d'un algorithme d'estimation des réflectances. Le schéma algorithmique présenté ci-dessous décrit les différentes étapes des calculs. Les fonctions sont représentées en jaune et rouge, leurs paramètres en pointillé, leurs entrées en bleu à gauche et leurs sorties en bleu à droite. Les fichiers source sont de couleur grise.

lecture_vgt.c
lecture_vgt.h

fonction **lecture_vgt** : lecture des données de réflectance en unsigned short (16 bits)

VGT-B10
Lambert

- chemin : adresse du fichier de données
- hauteur : hauteur de la matrice VGT
- largeur : largeur de la matrice VGT

mat :
matrice VGT

lecture_hrv.c
lecture_hrv.h

fonction **occupation_bloc_sol** : lecture directe par bloc de la carte d'OS

carte d'OS
résolution HRV

- chemin : adresse fichier d'occupation du sol
- hauteur_bloc
- largeur_bloc
- Oi : coord. ligne du 1er pixel (haut gauche) du bloc
- Oj : coord. colonne

mat_sol :
matrice contenant
le numéro de classe
par pixel.

fonction **proportion** : calcul des proportions de chaque classe dans chaque pixel

⁹ Georgin & Chaumeil, 2000, SCOT.

mat_sol

- resolution : nbre de pixels HRV dans un pixel VGT)
- hauteur : hauteur de la matrice HR.
- largeur : largeur de la matrice HR
- N : nombre de classe.

mat_occup :
matrice contenant
les proportions de
chaque classe dans
chaque pixel

bloc.c
bloc.h

fonction **par_bloc** : extraction des blocs de réflectance en unsigned short

Buffer VGT

- buffer :
- hauteur_bloc : hauteur du bloc
- largeur_bloc : largeur du bloc
- Oi et Oj : coordonnées du coin haut gauche du bloc
(résultat de l'autocorrélation sous IDL)
- largeur : largeur vraie de la matrice dont on veut tirer le bloc

buffer_bloc :
matrice de
réflectance VGT

estim.f

cfortran.h >> interfacage C/Fortran
solve_sytem.c >> procédures systèmes
eigen.c >> procédures systèmes
testeigenval.c >> procédures systèmes
matrix.h >> définitions des matrices
matrix2.h >> définitions des matrices

fonction **estimp** : calcul des paramètres du modèle de FAIVRE

Buffer VGT

- buffer :
- hauteur_bloc : hauteur du bloc
- largeur_bloc : largeur du bloc
- Oi et Oj : coordonnées du coin haut gauche du bloc
(résultat de l'autocorrélation sous IDL)
- largeur : vraie largeur de la matrice dont on veut tirer le bloc

**mu et sigma /
classe**

estim_reflec.c

fonction **predict** : calcul des réflectances estimées

Buffer VGT

- mu et sigma par classe (résultats de la fonction estimp)
- Yim=les reflectances lues
- Xim->me qui contient les proportions de chaque classe dans chaque pixel (résultat de proportion)

Rim :
reflectances
estimées pour
toutes les classes

Le programme principal de la forme `int main (int argc, void *argv[])` appelle séquentiellement les fonctions décrites ci-dessus, et rend en résultat les proportions estimées des réflectances par classe et par pixel.

III - RESULTATS ET ANALYSE

1- Correction des effets atmosphériques

Nous avons testé sur notre jeu de données les effets de la correction atmosphérique SPALTO. Visuellement, il est très difficile de constater les effets de la correction atmosphérique sur les réflectances de surface : la correction se caractérise seulement par la disparition d'un léger voile sur l'image corrigée, correspondant à l'atmosphère.

On remarque cependant que les valeurs des réflectances de surface varient significativement, avec les différences suivantes (attendues), et selon les longueurs d'onde¹⁰ (cf annexe 3):

- dans le bleu (XS1), la correction atmosphérique diminue la valeur de la réflectance jusqu'à un certain seuil (réflectance = 0,2) à partir duquel on constate une inversion de la tendance, avec une augmentation de la réflectance de surface ;
- dans le rouge (XS2, pour l'observation des couverts végétaux), l'inversion de tendance pour les fortes réflectances est plus rapide et les réflectances de surface sont globalement supérieures aux réflectances TOA, de l'ordre de 20 % au maximum ;
- dans le PIR et le MIR, $R_{surf} > R_{toa}$ et ce d'autant plus que la végétation est dense (jusqu'à 10% en correction relative).

La conséquence pour le NDVI (fig. 16) est une légère augmentation pour les sol (0.01) à une forte augmentation pour les couverts végétaux (0.10), ce qui est tout à fait cohérent avec les résultats trouvés dans la littérature. En comparant les valeurs de NDVI, on constate un étirement de la courbe de tendance entre les valeurs corrigées et les valeurs non corrigées. Cette augmentation du contraste entre les valeurs de NDVI des sols et de la végétation va permettre la réalisation de meilleures classifications, basées sur des données plus faciles à différencier.

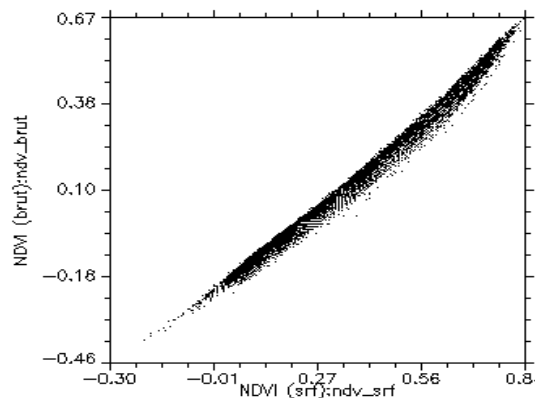


Figure 16 : Valeurs des NDVI avant et après correction (2 janvier 2002)

Si l'on s'intéresse aux profils de NDVI sur des données non corrigées, on se rend compte qu'ils sont fortement brouillés par les effets atmosphériques, alors que les profils des données corrigées de surface offrent des représentations bien plus nettes de l'évolution de la végétation. Les corrections vont donc permettre par cette clarification des valeurs de NDVI des interprétations plus fiables sur le développement phénologique.

¹⁰ Cf Annexe 3 : Effets de la correction atmosphérique sur les bandes spectrales HRV.

La comparaison avec une autre méthode de correction des effets atmosphériques a été testée afin de valider les résultats obtenus avec Spalto. La méthode des invariants consiste à repérer sur les séries d'images des régions d'intérêt où les valeurs des réflectances interdates restent stables et, à partir d'une image de référence (obtenue par la moyenne des valeurs de toutes les dates) à effectuer les corrections en relatif (calculs des courbes de régression pour chaque bande). Cette méthode a été utilisée ici en validation, en croisant toutes les dates entre elles et en observant les courbes de tendance, avec pour objectif de déterminer les écarts sur les valeurs censées rester invariantes à travers Spalto.

Il apparaît que, globalement, la correction est homogène et correspond à nos attentes. La figure 17 illustre un croisement réalisé entre une image de référence corrigée avec la méthode des invariants et une image corrigée avec SPALTO : la droite coupe bien l'origine et le coefficient de corrélation est élevé :

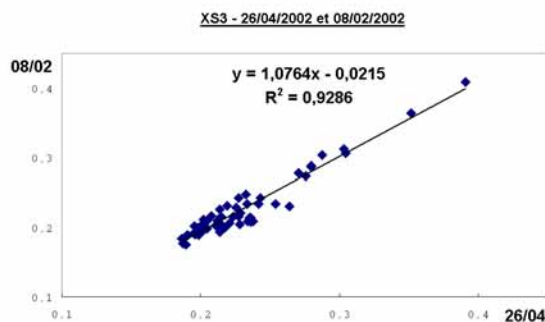


Figure 17 : Droite de régression correction SPALTO/méthode des invariants.
L' image de référence du 26 avril est corrigée avec la méthode des invariants
et l'image du 08 février est corrigée avec SPALTO.

Seule la correction réalisée sur les images SPOT 2 montre des incohérences et n'as pu pour l'instant pas être validée. Ces imprécisions ne remettent pas en cause le programme SMAC qui fonctionne correctement quelque soit le satellite, ni le programme informatique qui a été correctement modifié, mais il s'agit ici d'un problème d'étalonnage. En effet, n'ayant pas à notre disposition les fichiers d'étalonnage adéquats pour SPOT-2, nous avons été contraints de prendre par défaut les coefficients d'étalonnage de Spot 4. La méthode des invariants n'a alors pas permis de valider cette correction, et il sera donc nécessaire d'attendre du CNES les coefficients adaptés. Il aurait également été intéressant de comparer nos résultats sur un même jeu de données avec des corrections réalisées sur FLAASH, mais ce module (additionnel) d'ENVI dédié à la correction atmosphérique d'ENVI, n'était pas disponible dans la version logiciel équipant le CESBIO.

2- Superposition des produits HRV et VEGETATION

Les coefficients de corrélation obtenus sont en général supérieurs à 0,8, de l'ordre de 0,9 en moyenne, ce qui est satisfaisant. Par exemple, pour une autocorrélation entre une image HRV du 15 mars 2002 et son image VEGETATION B-10 correspondante (du 11 au 20 mars 2002), on obtient pour les mêmes coordonnées :

HRV ligne	44
HRV colonne	22
VGT ligne	23
VGT colonne	61

avec des coefficients allant entre 0,88637 pour les bandes B3 à 0,90002 pour les bandes B2.

HRV ligne et colonne correspondent à l'origine de la dégradation de HRV et VGT ligne et colonne correspondent à la zone de superposition HRV/VGT.

L'exemple ci-dessous de la superposition d'une image HRV sur une image VEGETATION illustre le résultat final d'une autocorrélation automatique. On remarque à gauche que la simulation de dégradation HRV correspond bien à l'image basse résolution, et à droite que les zones de couleurs identiques (vertes au centre, bleu foncé au Nord et au Sud-Est) coïncident bien et que la continuité est respectée.

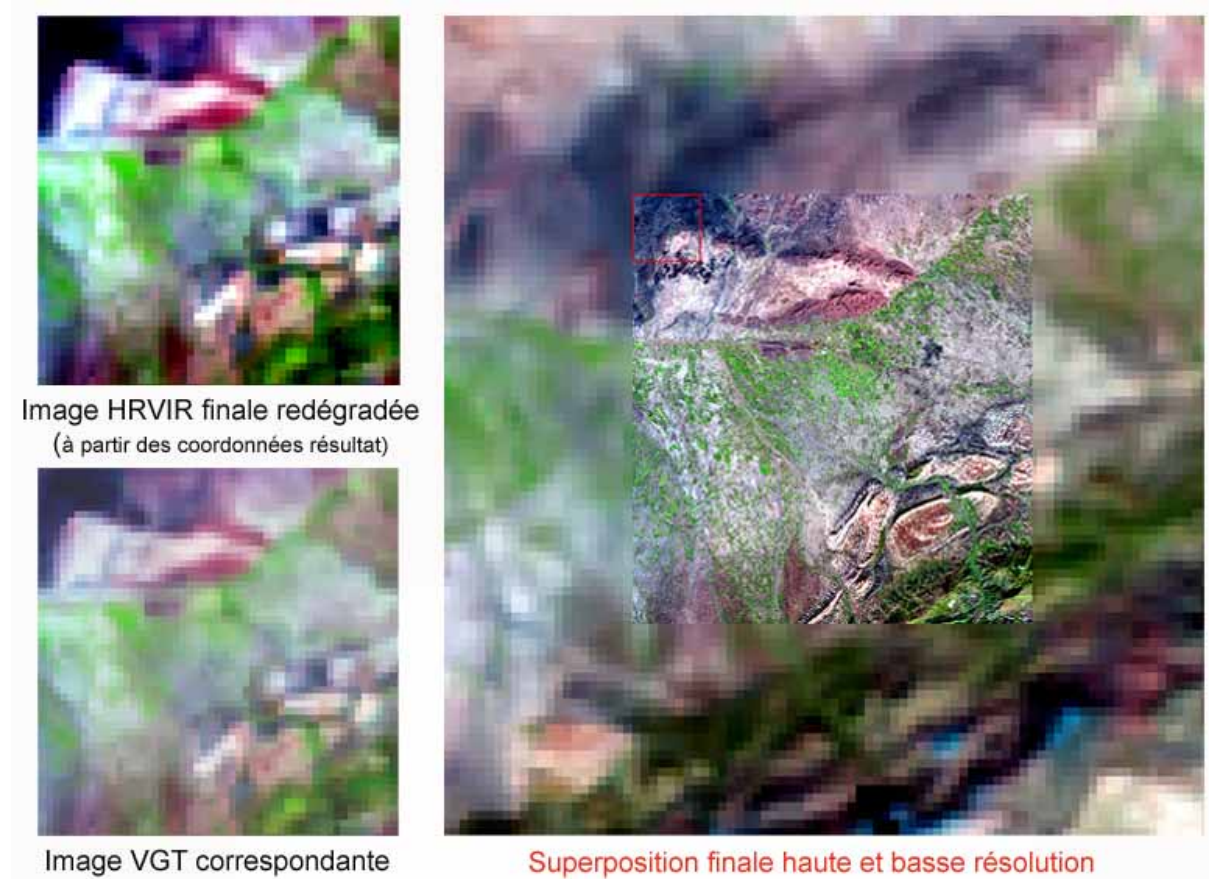


Figure 18 : Superposition HRVIR/VEGETATION à partir d'une autocorrélation automatique (08/02/2002)

Du point de vue de la performance, et appliqué sur des matrices assez importantes (les matrices HRV extraites représentent environ 2500 * 2500 pixels), le programme d'autocorrélation automatique affiche des performances satisfaisantes au regard de :

- la complexité de l'algorithme : par exemple pour des matrices du type de celle de la figure ci-dessus (décalage de 30*30 pixels), il faut environ deux heures de traitement en résolution maximale, pour une précision de 20 mètres.
- sa comparaison avec des algorithmes réalisant un traitement identique : par exemple, un programme similaire développé en Matlab¹¹ et utilisant les fonctions identiques, mettait environ trois jours à tourner pour des matrices de taille beaucoup plus faible (temps de traitement de l'ordre de 30 fois inférieur pour IDL et ENVI).

¹¹ Groult E., 2002.

3- Perspectives de la déconvolution

Une fois les résultats de la déconvolution disponibles, il sera alors possible de contraindre les modèles de la FAO décrits en première partie par les données de télédétection pour le calcul de bilans hydriques. Nous exposons ici les perspectives attendues.

Il sera premièrement possible de tracer les profils temporels de réflectances dans le Rouge et le Proche InfraRouge (exemple en figure 19).. Le profil de NDVI constitué à partir de ces séries temporelles de réflectances permettra de déterminer le cycle de culture et d'estimer l'indice foliaire des couverts. Un exemple d'une carte de NDVI associée à une carte de LAI est présentée en figure 20. Ces séries temporelles de cartes permettront ensuite d'extraire les coefficients cultureux nécessaires à la mise en oeuvre des modèles simples de la FAO¹² pour l'estimation du bilan hydrique à l'échelle régionale et à un pas de temps décadaire.

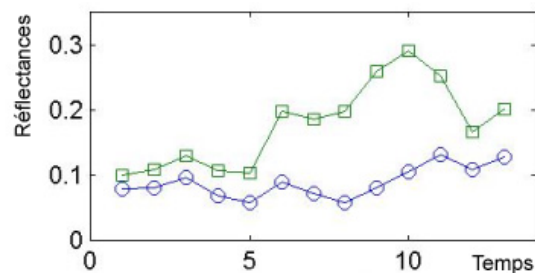


Figure 19 : Profil temporel de réflectances (bandes B2 et B3) (source SCOT)

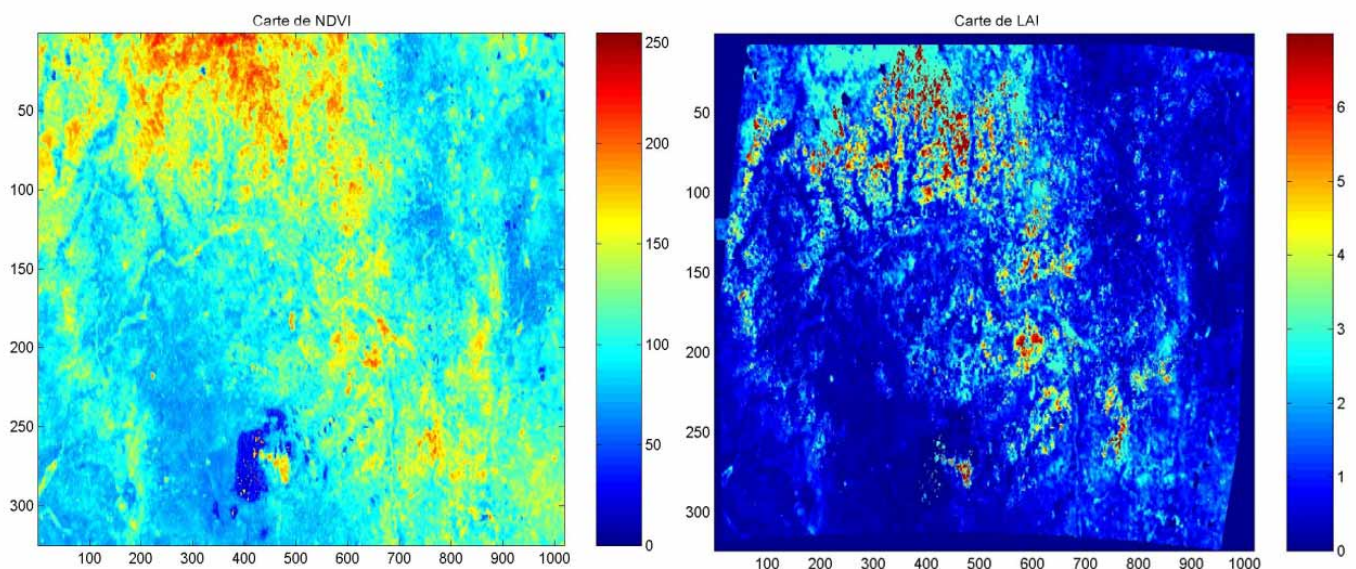


Figure 20 : Cartes de NDVI et de LAI extraites

¹² Cf Magnac. M, 2002.

Conclusion

Se basant sur des données de télédétection brutes issues du satellite SPOT-4, ce travail a abouti à une harmonisation de la radiométrie, des formats, des systèmes de projection et de la précision de géoréférencement : l'exploitation simultanée des avantages respectifs des deux capteurs – haute résolution spatiale pour le capteur HRVIR et haute répétitivité temporelle pour le capteur VEGETATION – est alors rendue possible par la déconvolution des séries d'images et l'obtention des profils caractéristiques de la végétation de la zone étudiée.

Ces étapes successives de corrections correspondent au développement d'une chaîne de traitement complète comportant quatre étapes principales pour fournir pour des séries de couples d'image HRV-VEGETATION :

- une **homogénéisation radiométrique**, par un étalonnage et une correction atmosphérique basée sur le programme SPALTO. L'obtention de résultats cohérents et la validation de cette méthode de correction atmosphérique constitue la base de la chaîne de traitement. De plus, l'interfaçage du programme de correction atmosphérique avec le logiciel de traitement d'images ENVI en mode interactif, constitue un outil utile pour tous les utilisateurs d'images SPOT du CESBIO, et pourra être installé sur chaque poste de travail ;
- une **homogénéisation des formats et des systèmes de projection** : à partir de deux listes d'images HRVIR et VEGETATION et d'images de référence, les décompressions et renommages, changements de projection et recentrages, conversion de formats et créations de fichiers d'en-tête s'enchaînent automatiquement, de manière transparente pour l'utilisateur, et permettent de gérer les gros volumes de données inhérents à ces séries d'images (particulièrement pour les SPOT-VEGETATION) ;
- un **coalignement précis** des deux types de données : le développement d'un programme d'autocorrélation automatique en IDL, dont le principe est basé sur la recherche de la meilleure corrélation entre une matrice VEGETATION et une matrice HRVIR qu'on dégrade à la taille du capteur grand champ, a montré son efficacité pour superposer avec précision des images haute et basse résolution. Ce programme de superposition d'images de résolutions différentes est performant en comparaison avec des codes développés dans d'autres langages. Il est également intéressant de par sa convivialité et son adaptabilité : en modifiant simplement les paramètres de l'interface graphique (facteur de rééchantillonnage), on peut facilement obtenir des superpositions entre tous les types de capteurs existant (SPOT-HRV et LANDSAT-TM, ou SPOT-VEGETATION et ASTER) ;
- l'obtention des **profils caractéristiques** des espèces dominantes est dorénavant dépendante de la fourniture de fichiers manquants à des codes sources effectuant le module de déconvolution spectrale. Une fois cette étape franchie, il sera alors possible de faire tourner l'algorithme qui a préalablement été adapté à nos besoins spécifiques, et d'extraire ainsi les données nécessaires au paramétrage des modèles de suivi de la végétation et de bilans hydriques.

Finalement, ce stage a été personnellement très enrichissant puisqu'il m'a permis d'une part d'approfondir mes connaissances en traitement d'images et en télédétection, et d'autre part de mettre en pratique les compétences acquises en programmation tout au long du DESS : perfectionnement en programmation C, maîtrise d'un nouveau langage matriciel, IDL, et des concepts de programmation ENVI, interfaçage du C et du Fortran, développement d'interfaces graphiques...

Table des illustrations

Figure 1 : Courbes de réflectance type de la végétation et du sol	7
Figure 2 : Variation temporelle d'un coefficient A_k (HRVIR2, MIR)	10
Figure 3 : Schéma de l'algorithme SPALTO	11
Figure 4 : Principe de l'autocorrélation HRVIR-VEGETATION.	12
Figure 5 : Principe d'obtention des profils spectraux par déconvolution	13
Figure 6 : Dates de lancement et capteurs embarqués sur les 5 satellites SPOT	15
Figure 7 : Longueurs d'onde des bandes spectrales de SPOT 4.	15
Tableau 1 : Caractéristiques principales des instruments de SPOT 4 (données Spot Image)	16
Figure 8 : Exemple d'image VEGETATION B-10 sur le bassin Méditerranéen (mai 2002)	17
Figure 9 : Mosaïque d'images SPOT 4 HRVIR (mars 2000) de la zone d'étude	18
Tableau 2 : Données HRVIR et VEGETATION disponibles	19
Figure 10 : Interface d'écriture VEGETATION au format ENVI et création de header	23
Figure 11 : Interface de changement de projection et recentrage VEGETATION	24
Figure 12 : Extraction des coefficients atmosphériques d'une matrice WVG VEGETATION-P	25
Figure 13 : Interface graphique de Spalto sous ENVI	27
Figure 14 : Menu ENVI Spectral avec SPALTO.	28
Figure 15 : Interface ENVI du programme d'autocorrélation HRV/VEGETATION	31
Figure 16 : Valeurs des NDVI avant et après correction (2 janvier 2002)	34
Figure 17 : Droite de régression correction SPALTO/méthode des invariants.	35
Figure 18 : Superposition HRVIR/VEGETATION à partir d'une autocorrélation automatique (08/02/2002)	36
Figure 19 : Profil temporel de réflectances (bandes B2 et B3) (source SCOT)	37
Figure 20 : Cartes de NDVI et de LAI extraites	37

Acronymes

CESBIO : Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère.

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre

HRVIR : Haute Résolution dans le Visible et l'Infra Rouge

MIR : Moyen InfraRouge

PIR : Proche InfraRouge

TOA : Top Of Atmosphere

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

SMAC : Simplified Method for the Atmospheric Correction

LAI (Leaf Area Index) : quantité de feuilles pour une surface de sol élémentaire, sans unité

FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) : fraction de la radiation absorbée par le couvert

HRVIR (Haute Résolution Visible et Infra-Rouge) : capteur haute résolution installé sur les satellites SPOT

VGT (VEGETATION) : capteur basse résolution installé sur les satellites SPOT 4 et 5

HDF ((Hierarchical Data Format) : format scientifique de données pouvant contenir aussi bien des images que des données scientifiques

BIL (Band Interleaved by Line) : entrelacement de l'image par ligne

BSQ (Band Sequential) : entrelacement de l'image par image

BIP (Band Interleaved by Pixel) : entrelacement de l'image par pixel

CAP (Format SPOT Scene standard) : format des images SPOT-4, fournies par le Centre d'Archivage et de Prétraitement de SpotImage

CEOS (Comité pour les Satellites d'Observation de la Terre) : par extension, ancien format d'image satellite des images SPOT

Bibliographie

Faivre R., Fisher A., 1997- **Predicting crop reflectance using satellite data observing mixed pixels.** Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics, vol. 2, number 1, 87-107.

Faivre R., Bastié Ch., Husson A., 2000- **Integration of VEGETATION and HRVIR into Yield estimation.** Proceedings of symposium VEGETATION 2000 "Two years of operation to prepare the future", Lake Maggiore, Italy, 3-5, edited by G. Saint, published by the Joint Research Center of the European Commission, Ispra, Italy, p. 235-239.

Fontannaz D., 2001- **Land Cover Multisensor Analysis and Change Detection in Tensift Al Haouz Plain, Morocco.** MASTER TRISIG, Post Graduate Diploma in Geo-information, GDTA.

François P., 2002- **Caractérisation de l'occupation du sol à partir d'une série d'images temporelle - Plaine du Haouz (Maroc).** DESS SIGMA, INP ENSAT, UT1, CESBIO.

Georgin C., Chaumeil C., 2000- **Estimation de la production et du rendement sur des zones agricoles au moyen de l'observation spatiale basse-résolution de l'instrument Vegetation.** Rapport de stage, Université P. Sabatier, SCOT.

Groult E., 2002- **Traitement et exploitation d'images haute et basse résolution du satellite SPOT 4.** CESBIO, CNES, INP-ENSEEIH.

Magnac M., 2002- **Interprétation des changements des états de surface en terme de leur impact hydologique par la méthode FAO.** DESU Université Paul Sabatier, CESBIO.

Rahman H., Dedieu G., 1994- **SMAC : a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum.** International Journal of Remote Sensing, Vol. 15, N°1, p. 123-143.

Research Systems , 2000- **ENVI Programming, Extending Envi with IDL.** Training course manual.

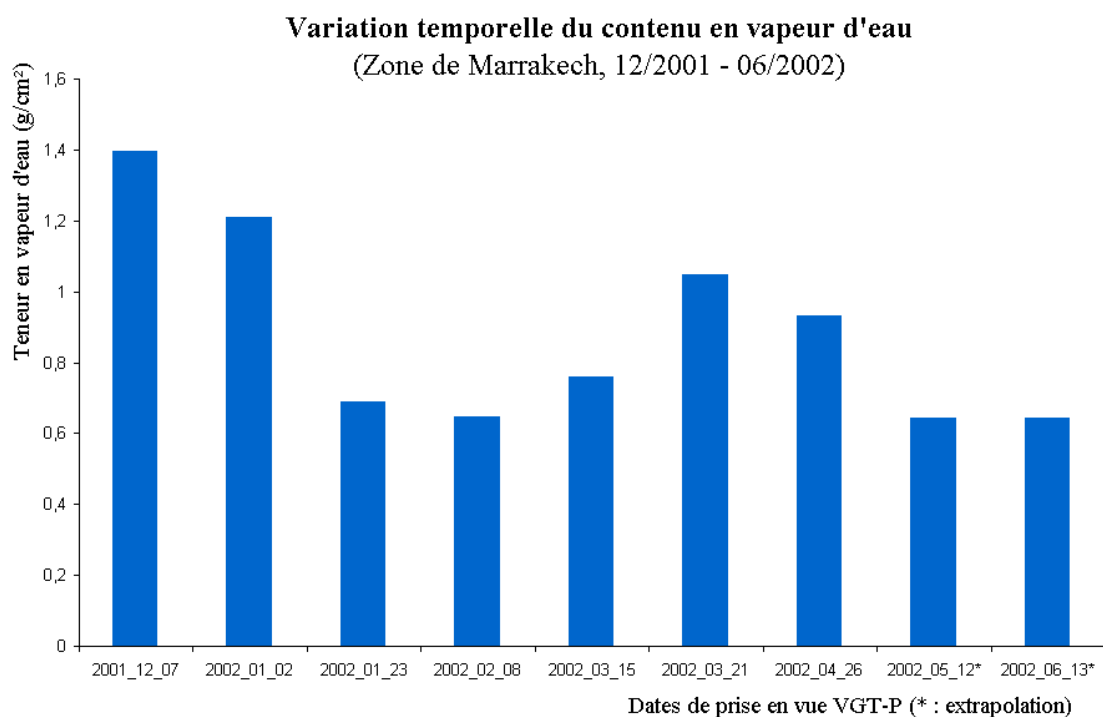
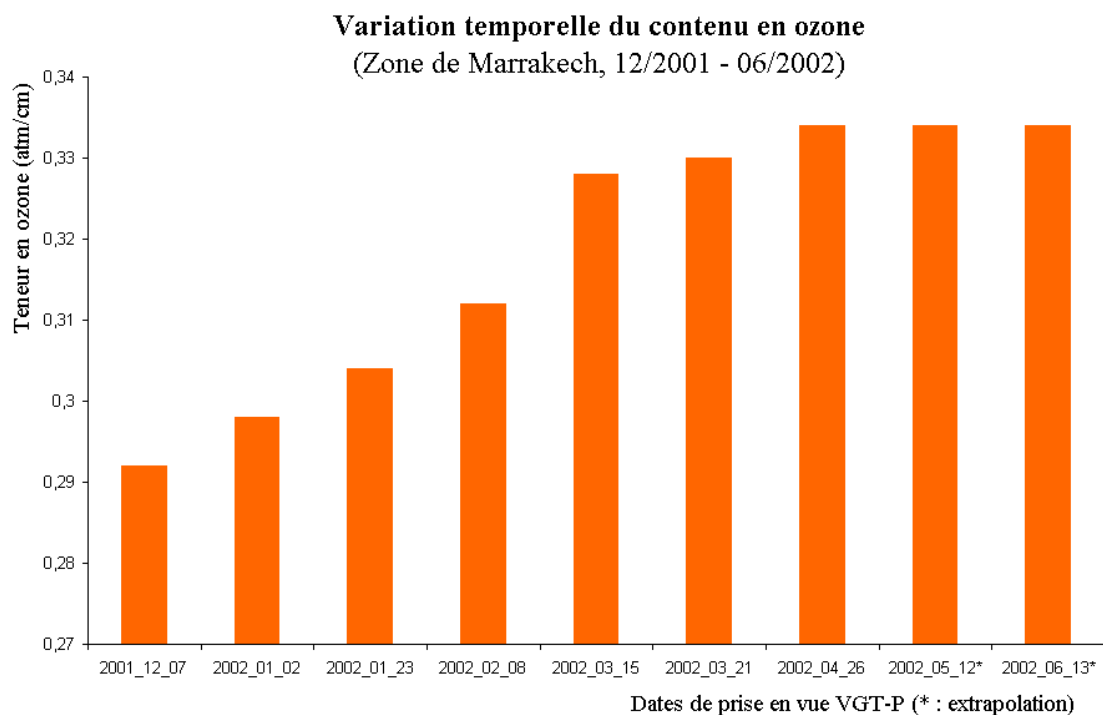
Research Systems , 2002- **Intermediate Programming and Analysis with IDL.** Training course manual.

Zine S., 2000- **Déconvolution des signatures spectrales de series d'images satellitaires : application à la surveillance écologique de milieux arides.** DEA Sciences de l'Information Géographique, ENSG, Cameleo, EGEO.

Annexes

Annexe 1 : Coefficients atmosphériques extraits des images Spot VEGETATION-P

Le coefficient de teneur en aérosol, constant sur la fenêtre de temps considérée, n'est pas représenté ici.



Annexe 2 : Exemple de codage d'un programme IDL : fichier auto_correl.pro

```

;-
; NAME: auto_correl.pro
; PURPOSE: - Automatic autocorrelation of HRV/VGT couple
; CALLING SEQUENCE: correlation, pas, fact
; INPUTS: - liste_hrv_srf
;          - liste_vgt_correlation
;          - degradation factor
;          - resampling factor
; OUTPUTS: - resultat_correlation.txt
;-

pro CORRELATION, pas, fact

;INTERFACE GRAPHIQUE
base = widget_auto_base(title='Corrélation automatique Spot HRV-VGT')
frame1=widget_base(base, /col, /frame)
file_hrv_default = 'E:\codes\AutoCorrelation\liste_hrv_srf.txt'
file_hrv = widget_outf(frame1, prompt='Liste d\'images HRV', $ uvalue='fileH',
DEFAULT=file_hrv_default, XSIZE= 55, /auto)
. . .
path_out = 'E:\codes\AutoCorrelation\datas'
path = widget_outf(frame1, prompt='Répertoire de sortie', uvalue='path', $
DEFAULT=path_out, /auto, /DIRECTORY)
. . .
pas = widget_param(param_base1, dt=2, field=1, floor=1, xsize=1,$
DEFAULT=5, uvalue='pas', /auto, prompt='Pas de dégradation')
. . .
result = auto_wid_mng(base)

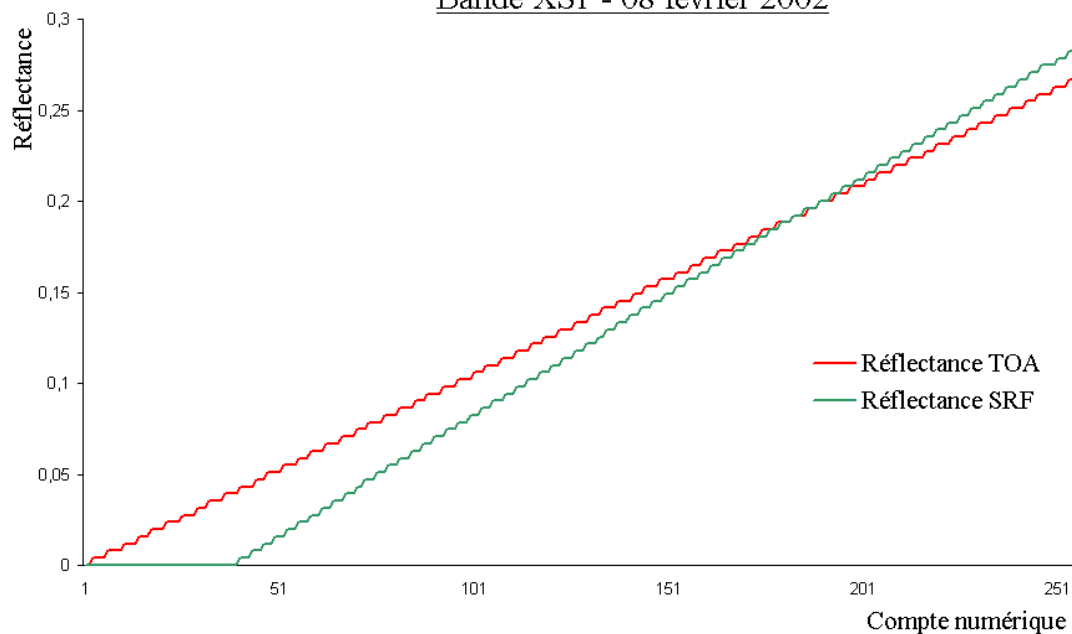
;OUVERTURE FICHIERS D'IMAGES ET COMPARAISON DES DATES
file_hrv=result.fileH
OPENR, lunfile_hrv, file_hrv ,/GET_LUN
ptrhrv=''
. . .
WHILE NOT(EOF(lunfile_hrv)) DO BEGIN
  READF, lunfile_hrv, ptrhrv
  datel = STRMID(ptrhrv, (STRLEN(ptrhrv)-8),8)
  . . .
    cmp=STRCMP(datela, date2a)
    IF (cmp EQ 1) THEN BEGIN
      . . .
        ENVI_OPEN_FILE, ptrhrv, r_fid=fid_hrv
        if (fid_hrv eq -1) then return
        ENVI_FILE_QUERY, fid_hrv, ns=ns_hrv, nl=nl_hrv, pos_hrv=[0]
        . . .
          fact = STRTRIM((uint(result.fact)), 1)
          pas = STRTRIM((uint(result.pas)), 1)
          . . .
            ;BOUCLE DE D'EXTRACTION ET DE CORRELATION
            FOR s_hrv=0, 49, pas DO BEGIN
              FOR l_hrv=0, 49, pas DO BEGIN
                matr_hrv=REBIN(temp_hrv, sreb, lreb)
                . . .
                  matr_hrv_corr=matr_hrv[*]
                  . . .
                    R=CORRELATE(matr_vgt_corr, matr_hrv_corr)
                    . . .
              . . .
            . . .
          ,ECRITURE DU FICHIER RESULTAT
          name_fich=result.path+'\resultat_correlation.txt'
          OPENW, lunfich, name_fich, /APPEND, /GET_LUN
          PRINTF, lunfich,"CORRELATION n° ", STRTRIM(count,1) , " entre : "
          PRINTF, lunfich,"Image HRV du : ", datel
          . . .
            PRINTF, lunfich,"HRV ligne : " , STRTRIM(l_hrvmax,1)
            PRINTF, lunfich,"HRV colonne : " , STRTRIM(s_hrvmax,1)
            PRINTF, lunfich,"VGT ligne : " , STRTRIM(l_vgtmax,1)
            PRINTF, lunfich,"VGT colonne : " , STRTRIM(s_vgtmax,1)
          . . .
        FREE_LUN, lunfile_hrv
        . . .
      END
    . . .
  . . .
END

```

Annexe 3 : Effets de la correction atmosphérique sur les bandes HRV XS1 et 2 (8 février 2002)

Effet de la correction atmosphérique : réflectance TOA et de surface

Bande XS1 - 08 février 2002



Effet de la correction atmosphérique : réflectance TOA et de surface

Bande XS2 - 08 février 2002

