

Etude par imagerie radar des pollutions pétrolières

Oil pollution using radar imagery

A. Gaye, Y. Marchand

*U.M.R. 6063 I.D.E.E.S., Equipe MTG
Département de Géographie, Université de Rouen
76 821 Mont Saint-Aignan Cedex, France
gaye.amadou@caramail.com
yvette.marchand@univ-rouen.fr*

G. Rees

*Scott Polar Research Institute, University of Cambridge,
Lensfield Road, Cambridge CB2 1ER, Royaume Uni
gar2-rsg@spri.cam.ac.uk*

Résumé.

En Russie, chaque année, les déversements de pétrole représentent un cinquième de la production totale. Les plus importants se produisent dans le domaine périglaciaire où le milieu naturel est d'une extrême fragilité. Les pipelines sont soumis à de rudes conditions notamment à la corrosion et aux processus cryogéniques. Le risque de rupture augmente en conséquence. La surveillance des déversements *d'hydrocarbures*, contrainte par l'immensité et la fréquente inaccessibilité du réseau de pipelines, peut être réalisée par le recours à la télédétection. L'objectif de ce travail est de fournir, à travers l'exemple de la catastrophe d'Usinsk (Rép. de Komi) survenue en 1994, des outils d'analyse des images radar. Outre leur capacité à s'affranchir du couvert nuageux, les capteurs radar apportent des informations complémentaires à celles fournies par des capteurs optiques. L'exploitation thématique de ces images est rendue difficile par un certain nombre de facteurs perturbateurs tels que les caractéristiques propres du capteur, la direction de visée, la topographie et le phénomène de chatoiement (speckle). Le travail présenté montre le rôle prépondérant joué par ces corrections qui permettent de disposer de données quantitatives comparables d'une date à une autre. La méthode mise au point ici pour le suivi temporel de l'épanchement de pétrole d'Usinsk à partir de trois images radar, est discutée notamment dans ses limites et son aspect opérationnel possible.

Mots-clés : Hydrocarbures, pollution, imagerie radar, pipeline, Russie, Arctique.

Abstract.

Every year, up to a fifth of Russian oil production is lost through leakage. The largest oil spills occur in the Russian North where permafrost is often present. Pipelines are subject to corrosion and cryogenic processes. The risk of rupture increases consequently. The oil spill monitoring is limited by the vastness and the frequent inaccessibility of the pipeline network and therefore, requires remotely sensed data. This work on Usinsk's disaster, which occurred in 1994, aims at giving some low-level tools for analysing SAR data. Some disturbing factors such as the characteristics of the sensor, the sensor look direction, the topography and the speckle, make difficult the SAR data processing. The determination of the characteristics of the target depends on the knowledge of these disturbing effects. This study shows the key role that these corrections play for the interpretation of multitemporal SAR backscattering. The

method developed here for the multitemporal study of the Usinsk's oil spill using 3 SAR images is discussed especially in terms of limits and possible uses as a routine.

Key-words: Hydrocarbons, pollution, radar imagery, pipeline, Russia, Arctic.

1 Introduction

La Russie est le premier producteur mondial de gaz et le troisième pour le pétrole. Ses immenses réserves et champs d'exploitation sont essentiellement situés dans le domaine polaire. De là, le pays exporte surtout vers l'Union européenne où il satisfait 20 % de la consommation de brut et de produits dérivés. Loyola de Palacio, commissaire européenne chargée de l'énergie et des transports¹, souligne que « *compte tenu des dangers récurrents du transport par voie maritime, il faut donner la priorité au transport par oléoduc. C'est une question qu'il faudra évoquer à court terme avec nos partenaires russes. Pourquoi, plutôt que d'envisager de nouveaux ports d'exportation, ne pas renforcer les capacités en transport par oléoduc à destination de l'Europe du pétrole produit en Sibérie ?* ». Les récentes marées noires en mer (*Erika* et *Prestige*) qui ont conduit à un tel commentaire, ne doivent pourtant pas masquer que d'ores et déjà, les plus grandes pollutions d'hydrocarbures ont probablement lieu dans le domaine continental et polaire russe.

La Russie possède près de 300 000 km de pipelines pour desservir les centres de consommation à partir des sites d'exploitation localisés essentiellement dans le Nord du pays (bassins de Petchora et de Sibérie occidentale) où les conditions naturelles sont extrêmes. Les pipelines sont soumis à la corrosion et aux processus cryogéniques. Or, ces deux phénomènes réduisent la durée de vie des infrastructures et de nombreux accidents sont répertoriés. La surveillance du réseau d'oléoducs et des déversements accidentels est contrainte par l'immensité de ces espaces et la difficulté d'accès imputables aux nombreuses traversées de zones marécageuses (Marchand, 1999). Elle peut alors être réalisée avantageusement par le recours à la télédétection. L'utilisation des capteurs optiques est limitée en milieu polaire par des jours réduits une partie de l'année et un couvert nuageux fréquent. A l'inverse, le radar offre des capacités d'acquisition par tout type de temps. De plus, le radar à synthèse d'ouverture, par sa sensibilité à la géométrie de la cible et à la constante diélectrique, apporte une information complexe nouvelle d'un grand intérêt. Pourtant, le réseau d'oléoducs de la Russie septentrionale ne fait pas actuellement l'objet d'une surveillance systématique par imagerie satellitale. Nous présentons ici une méthode développée pour le suivi de l'épanchement de pétrole, conséquent à la rupture de l'oléoduc, qui a eu lieu près d'Usinsk (bassins de Petchora, République de Komi, Russie) en été 1994 (fig. 1). Cette analyse repose sur une série d'images radar acquises à des dates différentes par le satellite ERS-1.

¹ Entretien accordé au Monde le 30 décembre 2002.

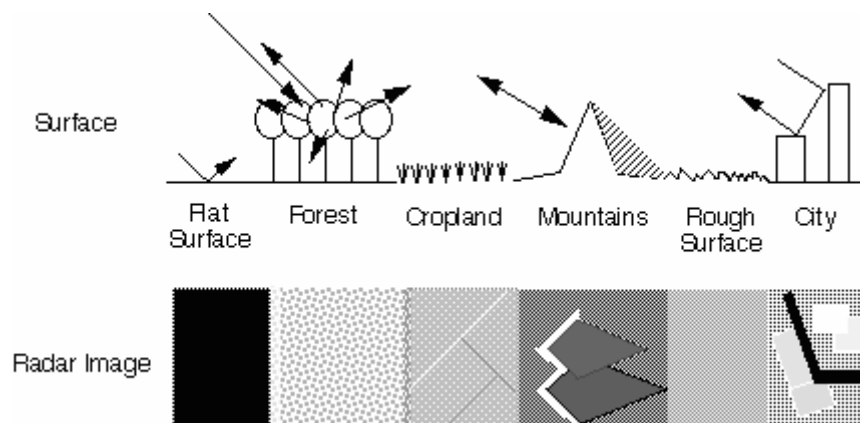
Figure 1 - Carte de localisation de Usinsk où 65 000 tonnes de pétrole ont été déversées en été 1994



2 Potentiel de l'imagerie radar pour la détection des épanchements de pétrole dans le domaine polaire russe

La télédétection radar est dite active dans la mesure où le capteur émet une onde et enregistre la partie qui lui est retournée. Le capteur AMI à bord du satellite ERS émet une onde radar de longueur 5,66 cm (λ), soit en bande C et avec une fréquence de 5,3 GHz. Le retour enregistré, appelé la rétrodiffusion, correspond à la part de la diffusion de l'onde radar, dans l'air et le milieu observé, qui revient au capteur dans sa direction. La diffusion peut être surfacique, à l'interface de l'air et du milieu, et/ou volumique, à l'intérieur du milieu. La figure 2 présente différents types de cibles imagés par un radar.

Figure 2 – Différents types de cibles imagés par un radar (source : <http://southport.jpl.nasa.gov/>)



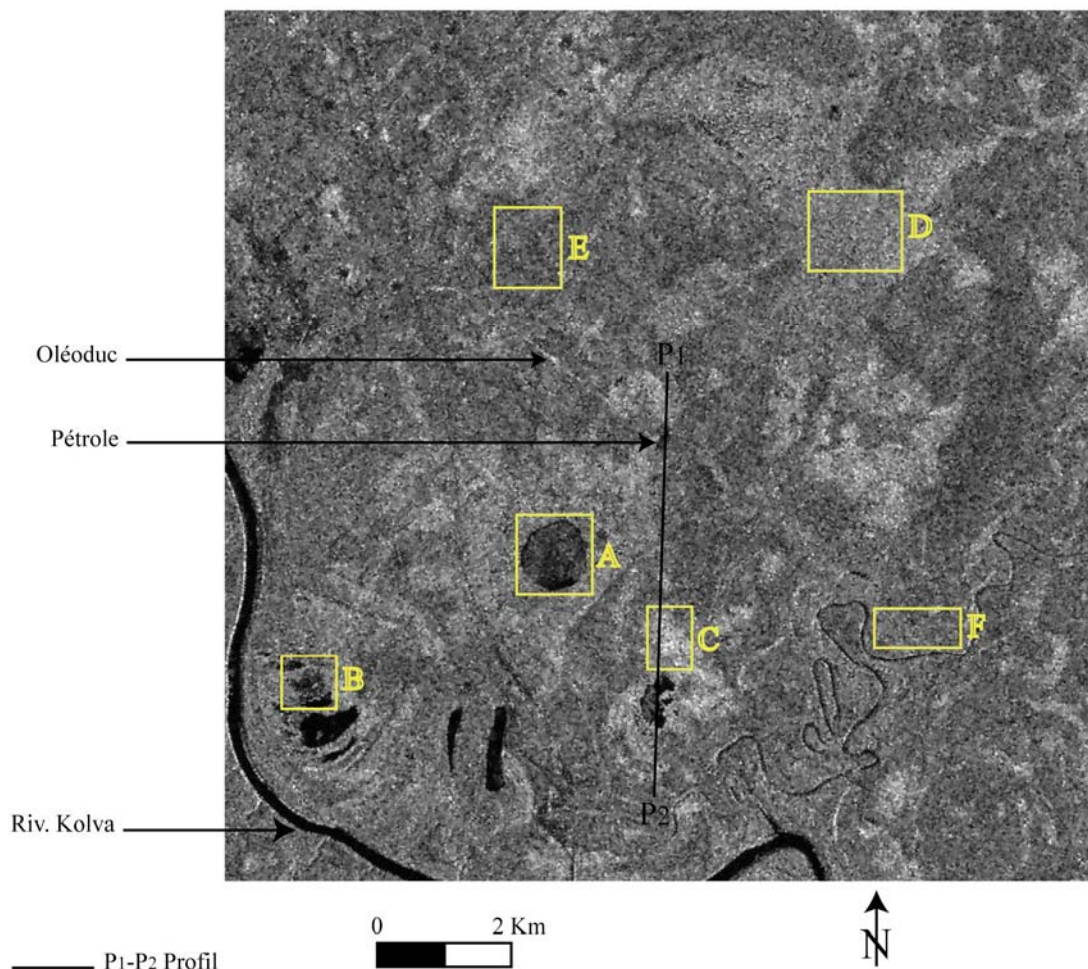
Pour la plupart des milieux terrestres, la rétrodiffusion relève de la diffusion de surface. Ces deux dernières sont corrélées positivement à l'exception des surfaces-miroir telle l'eau. En conséquence, nous nous intéressons en premier lieu à la modélisation de la diffusion de surface. Elle dépend d'une part, du contraste diélectrique² entre l'air ($\epsilon_{\text{air}}=1$) et le milieu rencontré, et d'autre part, de la rugosité du milieu rencontré, tel que :

$$\sigma_{\text{surface}}^0 = A(\epsilon_m) * B(r)$$

où $A(\epsilon_m)$ exprime le contraste diélectrique air-milieu (réflectivité de Fresnel) et $B(r)$, la rugosité de la surface (Ulaby, 1982 ; Wegmüller, 1990). Plus la constante diélectrique du milieu est élevée, plus le contraste avec l'air est fort ($A(\epsilon_m)$), et la pénétration de l'onde radar dans le milieu est moindre, donc la diffusion de surface grande ($\sigma_{\text{surface}}^0$). De la même façon, plus une surface est rugueuse ($B(r)$ fort), plus la diffusion de surface est grande. Ainsi, l'intensité de la rétrodiffusion est d'autant plus forte (blanc sur l'image radar) que le contraste diélectrique et la rugosité sont importants. La figure 3 présente les grands types de surfaces terrestres que nous allons discuter sur nos images ERS-1 dans les environs d'Usinsk.

Figure 3 - Image radar ERS-1 du 03/08/94 et les principales réponses des environnements terrestres (Projection UTM zone Nord 40, sphéroïde de Krasovsky)

A. eau, lac – B. zone marécageuse – C. sol nu et humide – D. sol humide à couvert végétal bas – E. sol sec à couvert végétal bas – F. couvert forestier – G. pétrole – P₁-P₂ Profil



² La constante diélectrique est désignée par ϵ .

2.1 Réponses radar des surfaces en eau et marécageuses et dégradation par le pétrole

Dans le cas d'une surface d'eau, le contraste diélectrique est fort entre les constantes diélectriques de l'eau (ϵ_{eau}) égale à 80 et celle de l'air (ϵ_{air}) égale à 1. La pénétration de l'onde est donc nulle et la diffusion se produit entièrement à l'interface. En absence de vent et de courant, la surface d'eau libre est plane et se comporte comme un miroir : la réflexion est spéculaire. Dans ce cas, la rétrodiffusion est nulle et l'eau apparaît en noir sur l'image (fig. 3-A). En présence de vents et/ou de courants, les vagues créent une rugosité de surface qui a pour effet d'augmenter la rétrodiffusion. Dans le cas d'une zone marécageuse, la contribution de la végétation à la diffusion de la surface, en raison de sa faible densité en éléments diffuseurs, est en première approximation négligeable. Sa rétrodiffusion peut alors être considérée comme égale à celle de l'eau (fig. 3-B).

Lorsqu'un épanchement de pétrole se produit, sa tension de surface³ diminue la rugosité et sa détection est dépendante de la vitesse du vent à la surface de l'eau. En mer les conditions de vitesse ont été déterminées ; afin de discriminer l'eau du pétrole, le vent doit être supérieur à 2-3 m/s et inférieur à 13 m/s (Fingas et Brown 1997 ; Litovchenko *et al* 1999). Ces conditions limites n'ont pas fait l'objet d'étude pour les surfaces d'eaux continentales (Allen et Wilson, 1995). Il est bien entendu que cette détection, se faisant par différenciation entre la nappe d'hydrocarbures et la surface d'eau libre, n'est implicitement possible que si ces deux environnements demeurent bien distincts. Si l'eau est totalement recouverte de pétrole, la discrimination devient impossible. Ce cas limite jamais atteint en mer, peut l'être pour les eaux continentales (lacs pollués).

2.2 Réponses radar des sols et de la végétation et dégradation par le pétrole

La diffusion d'un sol nu dépend de sa rugosité et sa teneur en eau. Cette dernière a pour effet d'augmenter la constante diélectrique du milieu et par-là, limiter la pénétration de l'onde radar. Lorsque le sol est humide (teneur volumique supérieure à 5%), pour des fréquences supérieures à 4 GHz, ce qui est le cas du capteur AMI de ERS, la profondeur de pénétration est négligeable. Ceci signifie que la diffusion volumique tend vers zéro et la rétrodiffusion dépend de la seule diffusion de surface (Ulaby, 1986 ; Wegmüller 1990). Pour un même sol, augmenter sa teneur en eau et/ou sa rugosité, a pour effet d'augmenter sa diffusion de surface soit, l'intensité de sa réponse radar. Un sol nu humide et fortement rugueux est ainsi caractérisé par une forte rétrodiffusion et apparaît sur l'image en clair (fig. 3-C).

Dans le cas d'un couvert végétal, la diffusion dépend de sa hauteur, sa teneur en eau et du sol sous-jacent. Lorsque la végétation est basse (< 15 cm), la diffusion peut encore se réduire à la diffusion de surface (Bernier *et al.*, 1996). La diffusion de surface $\sigma_{\text{surface}}^0$ est alors définie par (Ulaby, 1986) :

$$\sigma_{\text{surface}}^0 = \sigma_{\text{sol}}^0 + \sigma_{\text{veg}}^0$$

où σ_{sol}^0 est la contribution du sol et σ_{veg}^0 est la contribution du couvert végétal qui varie en fonction de sa densité et de sa distribution spatiale. La contribution du sol est la composante principale mais elle est atténuée par celle de la végétation qui diminue l'effet de la rugosité.

³ D'après le *Dictionnaire de Physique* (Lévy, 1988), la tension de surface (ou tension superficielle) est définie par les forces « responsables de la cohésion de la surface libre » d'un liquide. Ces forces sont telles que le long de toute ligne fictive partageant la surface libre en deux parties, il s'exerce une attraction réciproque des deux parties. La tension de surface est caractérisée par la constante de tension superficielle A couramment exprimée en erg.cm^{-2} . Pour un écoulement liquide, plus A est élevé, moins il se répand. Ainsi, en s'étalant sur une surface d'eau libre ($72 \text{ erg.cm}^{-2} \leq A_{\text{eau}} \leq 76 \text{ erg.cm}^{-2}$ (Weast, 1981)), le pétrole ($30 \text{ erg.cm}^{-2} \leq A_{\text{pétrole}} \leq 35 \text{ erg.cm}^{-2}$ (Klaus et Tewksbury, 1984)) abaisse la constante de tension superficielle de l'eau et augmente sa capacité d'étalement.

Ainsi, pour un couvert végétal peu dense et un sol humide (fig. 3-D), la rétrodiffusion est plus importante que pour un couvert végétal dense et un sol dont la teneur en eau volumique est inférieure à 5% (fig. 3-E).

Lorsque la végétation est haute (> 15 cm), la diffusion de la végétation est plus volumique que surfacique (Ulaby, 1982). La rétrodiffusion est dépendante de la densité du couvert. Elle est principalement due à la couronne des arbres (surface du couvert) mais prend aussi en compte la diffusion des troncs, des branches, des feuilles et du sol (volume du couvert). Ainsi, une forêt se distingue sur une image radar par sa texture grossière caractéristique (fig. 3-F).

Le comportement du pétrole dépend de sa température et de sa capacité d'adhésion. L'épanchement de pétrole est semi-solide pour une température inférieure à 12°C ce qui était celle du pétrole de la Kominest en 1994⁴. Son infiltration dans le sol est par conséquent, faible et il s'écoule selon la topographie à une vitesse déterminée par sa capacité d'adhésion. La constante diélectrique du pétrole⁵ est faible ($2 \leq \epsilon_{\text{pétrole}} \leq 2,2$) et donc le contraste avec l'air est faible, ce qui signifie qu'il y a pénétration de l'onde radar. Dans le pétrole, les composants ayant une taille très inférieure à la longueur de l'onde radar, il n'y a pas de diffusion volumique et la rétrodiffusion relève donc de la diffusion surfacique. Or, celle-ci est faible et spéculaire en raison de l'atténuation de la rugosité du substrat par la nappe d'hydrocarbures tant que le vent est inférieur à 13 m/s. En conséquence, la rétrodiffusion du substrat est considérablement atténuée par le polluant, un peu moins pour un couvert forestier où seule la partie de l'onde atteignant le sol est affectée. Cette diminution locale de la rétrodiffusion se caractérise, sur l'image radar, par une cuvette des valeurs d'intensité (zone plus sombre). Bien entendu, à long terme, la mort de certains végétaux induite par le polluant a des conséquences sur la réponse radar (disparition de la couronne des arbres).

2.3 Effets environnementaux

Dans les contrées considérées, le couvert neigeux est fréquent et doit donc être pris en compte. A Usinsk, il persiste jusqu'en juin et les premières précipitations neigeuses tombent au mois d'octobre. La neige a une faible constante diélectrique (ϵ_{neige}), comprise entre 1,3 lorsqu'elle est sèche, c'est-à-dire une teneur en eau volumique inférieure à 1 %, et 2,5 lorsqu'elle est humide. Le contraste diélectrique avec l'air est faible et l'onde radar tend donc à pénétrer le manteau neigeux d'autant plus qu'il est composé de neige sèche. En bande C, cas du capteur ERS1-AMI, pour des teneurs en eau volumique de 1 % et de 5 %, les profondeurs de pénétration sont respectivement de 15 et de 3 cm (Bernier *et al.*, 1996). Pour de la neige humide, la diffusion est réduite à la diffusion de surface par la teneur en eau qui bloque la pénétration de l'onde. La neige, lorsqu'elle recouvre les surfaces terrestres à l'exception de l'eau et des zones marécageuses, atténue la rugosité de surface et de ce fait, réduit la rétrodiffusion (Bernier 1996). Pour de la neige sèche, l'onde radar pénètre et rencontre un milieu hétérogène formé de glace et d'air, avec des composants dont la taille est de l'ordre de la longueur de l'onde radar, la diffusion volumique est alors importante et prime sur la diffusion surfacique. Finalement, la neige sèche présente une rétrodiffusion forte imputable à la diffusion volumique et la neige humide présente une rétrodiffusion moyenne, supérieure dans tous les cas à celle de l'eau.

L'épanchement de pétrole peut être postérieur ou antérieur aux précipitations neigeuses. Si le pétrole se répand sur la neige sèche le contraste entre les deux environnements est marqué et la détection de la nappe aisée. Sur de la neige est humide, le contraste sera moindre mais

⁴ Source : Centre de Technologie Environnementale. http://www.etcentre.org/etchome_f.html

⁵ Les valeurs des constantes diélectriques proviennent de *Dielectric Constant Reference Guide*, ASI Instruments Inc.

néanmoins, la détection encore possible. Si le pétrole répandu est recouvert par de la neige sèche, l'onde radar va pénétrer le manteau neigeux et éventuellement rencontrer la nappe d'hydrocarbure qui l'absorbera. A l'inverse, si le pétrole est recouvert par une neige humide, la pénétration de l'onde étant quasi-nulle, le pétrole n'est en théorie, pas détectable. Finalement, la détection du pétrole sous une couverture neigeuse dépend de la capacité de l'onde radar à l'atteindre ; possible avec de la neige sèche, selon la profondeur du manteau, la rétrodiffusion est abaissée, impossible avec de la neige humide, la rétrodiffusion demeure moyenne.

Au total, un épanchement de pétrole diminue la rétrodiffusion des surfaces avec lesquelles il est en contact. Généralement, sur ces surfaces, il est détectable mais il peut être recouvert par la neige. Sous celle-ci, il diminuera aussi la rétrodiffusion de cette surface à condition que le manteau neigeux ne soit pas trop profond et/ou que la neige ne soit pas trop humide.

3 Méthodologie

L'épanchement de pétrole, puisqu'il diminue la rétrodiffusion localement, est repérable sur une image radar par l'apparition d'une cuvette d'intensité des réponses. L'analyse multitemporelle se fonde sur la détection et la caractérisation de cette cuvette sur une série d'images acquises à différentes dates. Nous disposons de trois images ERS-1 dont la comparaison nécessite leur normalisation. Ce prétraitement comprend la réduction du bruit (speckle) et le passage des valeurs de l'image en unité de rétrodiffusion (§ 3.1). Ensuite, les traitements consistent à filtrer les données. Les filtres utilisés sont le filtre de Hamming pour le filtrage linéaire sur un profil de l'image radar (§ 3.2), et les opérations d'ouverture et de fermeture pour les filtrages de l'ensemble de l'image radar (§ 3.3). Il s'agit là d'outils opérationnels qui sont proposés en routine par la majorité des logiciels de traitements d'images mais sur des images binaires (noir & blanc). Or les images utilisées ici sont en niveaux de gris. Ces outils ont donc été développés afin d'être adaptés à ce type d'images, sur le logiciel Matlab lequel comporte un module de traitement d'images.

3.1 Prétraitements des images ERS-1

Les images, afin de rendre possible la comparaison et donc l'analyse diachronique, doivent être ramenées dans des conditions d'acquisition identiques. Les valeurs des images doivent aussi être exprimées en termes de grandeurs physiques, c'est-à-dire de coefficient de rétrodiffusion. Enfin, les images doivent être calées géométriquement de sorte qu'elles soient superposables.

Les données issues d'un radar à ouverture synthétique (ROS) ne permettent pas de déduire directement les coefficients de rétrodiffusion des éléments du paysage. En visée oblique, les données ROS sont affectées par les caractéristiques propres du capteur, le phénomène de chatoiement qui introduit du bruit (speckle), la direction de visée et finalement, la topographie. Il est donc nécessaire de corriger les effets de ces quatre types de perturbations. Ceci s'effectue selon un processus inverse à celui qui a conduit à la formation des images.

Premièrement, les perturbations dues au capteur sont corrigées par l'ESA. Elles comprennent les corrections d'antenne RSO en émission et en réception. Pour les données ROS des satellites ERS-1 et ERS-2 (SLC ou PRI⁶), l'ESA applique un étalonnage précis du capteur qui autorise l'utilisateur à traiter les images « *en considérant les valeurs comme ayant la dimension physique d'une Surface Equivalente Radar (cas d'un étalonnage absolu), ou comme la réflectivité radar du pixel* » (Adragna et al., 2000).

⁶ SLC = Single Look Complex (1 vue) – PRI = Precision Image (moyenne de 3 vues). Les SLC sont de moindre qualité que les PRI

Deuxièmement, la réduction du chatoiement, ou speckle, doit satisfaire le lissage des zones homogènes, la conservation des structures de l'image (lignes, contours, très forts réflecteurs...), la non-crédation d'artéfacts et la préservation de la texture. Il n'existe pas de critères objectifs permettant d'évaluer les performances d'un filtre (Tupin, 1997). L'atténuation du speckle doit impérativement se faire sur l'image radar en intensité (I). Or, nous disposons d'images en amplitude (A). Le passage s'effectue simplement de la façon suivante : $I = A^2$. Un filtre de Frost a été sélectionné pour réduire le chatoiement (Frost *et al.*, 1982). Ce filtre adaptatif modélise l'intensité de la scène à restaurer. Il prend en compte de façon explicite l'auto-corrélation spatiale de la scène en la modélisant par une fonction exponentielle décroissante. Le speckle est modélisé comme un bruit multiplicatif de la forme :

$$I = R * S$$

où I est l'intensité de l'image à filtrer, S le speckle et R la réflectivité de la cible à restaurer.

La taille du filtre retenu est de 5 * 5 pixels. L'image filtrée est obtenue en convoluant l'image par la réponse impulsionnelle du filtre de Frost qui a pour expression :

$$f(d_{i,j}) = C * \alpha * e^{-\alpha d_{i,j}} \text{ avec } \alpha^2 = C' * \gamma_1^2,$$

où $d_{i,j}$ est la valeur absolue de la distance entre le pixel (i,j) de l'opérateur de filtrage et le pixel central : elle caractérise la symétrie circulaire du filtre. C est une constante de normalisation égale à la somme des poids du voisinage considéré autour du pixel à filtrer, γ_1 est le coefficient de variation de la fenêtre de calcul considérée et, C' est une constante permettant de déterminer l'intensité du filtrage. Dans tous les cas, le filtrage est d'autant plus faible que C' est élevée (Lopes *et al.*, 2000). Toutefois, le speckle est réduit mais jamais complètement éliminé.

Troisièmement, la correction de la direction de visée est réalisée lors du passage des données en grandeurs physiques soit en termes de coefficient de rétrodiffusion. Celui-ci ($\sigma_{i,j}^0$) est exprimé en décibel (dB) pour le pixel (i,j), et obtenu à partir de l'expression (Robin, 2002) :

$$\sigma_{i,j}^0 = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{i,j} \sin(\theta_{i,j})}{K \sin(\theta_0)} \right),$$

où $I_{i,j}$ est l'intensité du pixel (i,j), K est le coefficient de calibration, θ_0 est l'angle d'incidence au centre de l'image et θ est l'angle d'incidence au pixel (i,j). Les valeurs du coefficient de calibration et l'angle d'incidence sont délivrées dans le fichier d'en-tête de l'image. Cette expression obtenue du coefficient de rétrodiffusion considère une topographie plane et horizontale.

Finalement, la correction de la topographie n'a pas été effectuée ici car d'une part, les modèles numériques de terrain de la Russie ne sont pas disponibles, et d'autre part, la région étudiée est plane. De plus, les trois images ont été acquises avec le même angle d'incidence. Ainsi, l'influence de la topographie sur les coefficients de rétrodiffusion est considérée comme négligeable. Par ailleurs, les variations topographiques ne modifient pas l'enregistrement de variations temporelles de la rétrodiffusion. Néanmoins, les données images ont été géoréférencées en utilisant une projection UTM (zone N40) et le sphéroïde de Krasovsky, ce qui les rend géométriquement superposables. Les traitements qui suivent sont réalisés sur les images radar ainsi prétraitées, c'est-à-dire qu'elles sont superposables et les valeurs sont les coefficients de rétrodiffusion.

3.2 Filtrage linéaire des profils radar

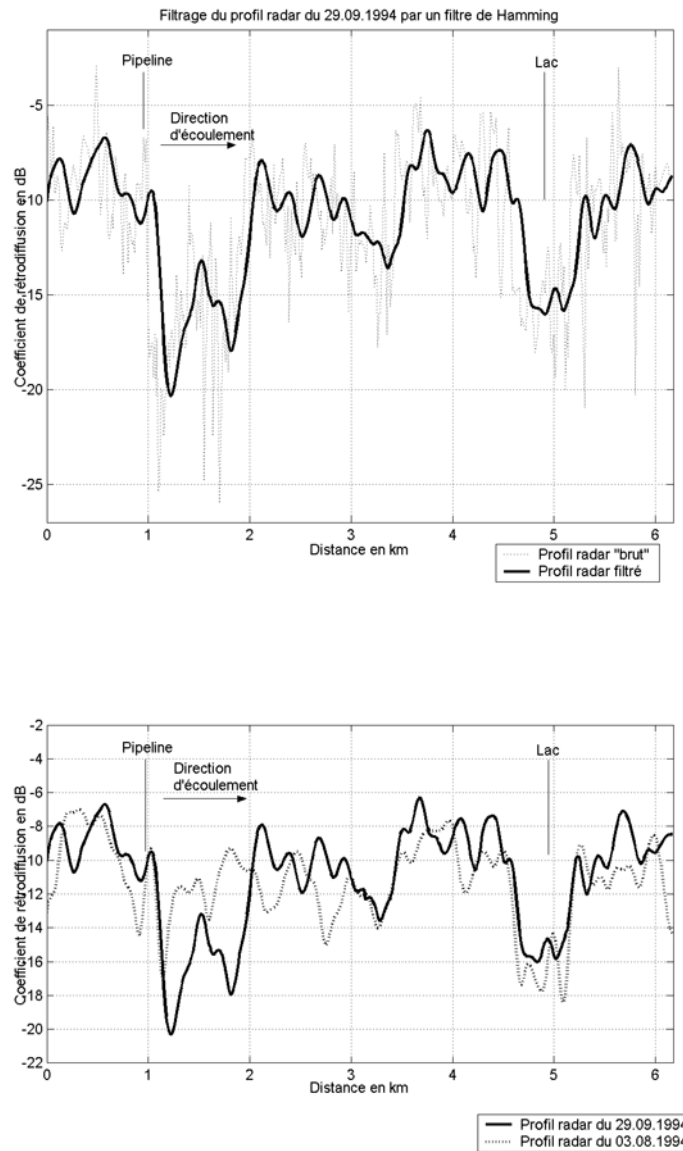
Dans le cadre de notre analyse diachronique, nous avons choisi d'intégrer à notre approche méthodologique, la réalisation et la comparaison de profils. Ils sont localisés sur chacune des images radar (fig 3-P₁-P₂) au même endroit, de l'oléoduc vers la rivière Kolva, dans une direction Nord-Sud, en passant par la zone polluée. Ils sont superposables. La première observation des profils radar fait apparaître un bruit encore important qui s'exprime par des variations fréquentes de courtes longueurs d'ondes spatiales du coefficient de rétrodiffusion (fig. 4). Il s'agit du speckle résiduel et de la variabilité de la distribution spatiale des éléments diffuseurs dans un milieu homogène. Ce bruit perturbe la lecture de la concavité des valeurs de l'image imputable à la nappe d'hydrocarbures, il faut donc l'atténuer pour l'interprétation.

Pour réaliser le filtrage de ce bruit, une première étape consiste à calculer la transformée de Fourier de chaque profil radar. L'observation des spectres d'amplitude autorise l'identification de la partie informative du signal radar, définie par son pic énergétique, et des parties bruitées dans les hautes fréquences spatiales, définies par de multiples modes énergétiques. Un filtre passe-bas normalisé est construit afin de réduire les secondes. La partie informative du profil radar est définie par les 9 premiers échantillons en fréquence spatiale. Le 9^{ième} échantillon correspond à la fréquence spatiale de coupure, au-delà nous considérons que la variation du signal est due au bruit. Le filtre est finalement appliqué aux profils radar qui ont été, pour l'occasion, allongés à chaque extrémité (+30 pixels) afin d'éviter les effets de bord du filtre sur la section d'intérêt pour notre étude (512 pixels soit 6,4 km avec un pixel de 12,5 m). C'est un filtre de Hamming qui a été appliqué. Ce filtre passe-bas est défini par sa réponse impulsionnelle :

$$\text{Hamming}(n) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \text{si } n \in \{1, \dots, N-1\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où n est l'échantillon spatiale à filtrer et N est égale à deux fois le nombre d'échantillons en fréquence spatiale avant coupure, ici $2 \cdot 9$. Le profil radar filtré est obtenu à partir de la convolution du profil radar par la réponse impulsionnelle du filtre.

Figure 4 - Profils radar avant et après filtrage de Hamming des images ERS-1 du 03/08/94 et du 29.09.94 (Projection UTM zone Nord 40, sphéroïde de Krasovsky)



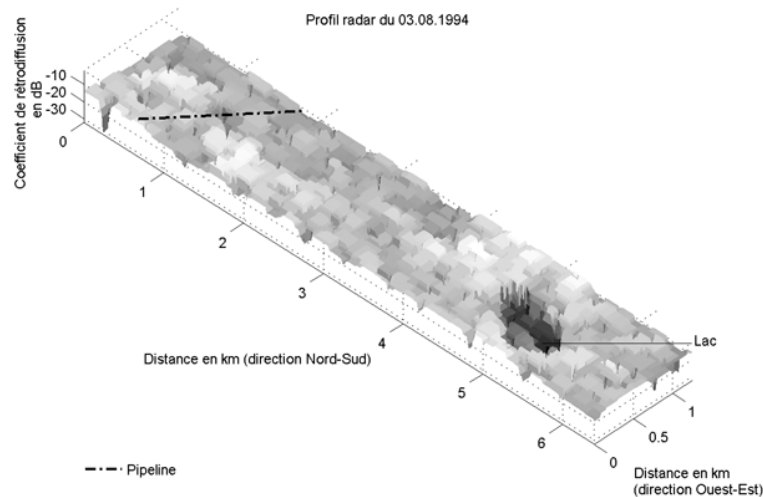
Les profils radar filtrés montrent nettement une concavité à proximité du pipeline qui s'étend vers le Sud. Cependant, l'opération de filtrage a rendu flous les contours des différents objets géographiques. Le filtrage réalisé résulte d'un compromis entre les réductions du contenu informatif total du signal et du bruit. Sur les profils radar les transitions entre les objets se traduisent par des variations de courtes longueurs d'ondes spatiales qui correspondent, au sein des spectres d'amplitude, à des variations de hautes fréquences spatiales. En ne retenant que le pic énergétique, on réduit alors de fortement le bruit mais également les variations significatives des transitions entre les objets géographiques. Par conséquent, si le filtrage permet facilement une première identification d'une concavité, il n'autorise pas une caractérisation spatiale satisfaisante de l'épanchement de pétrole et ne peut être appliqué sur l'image.

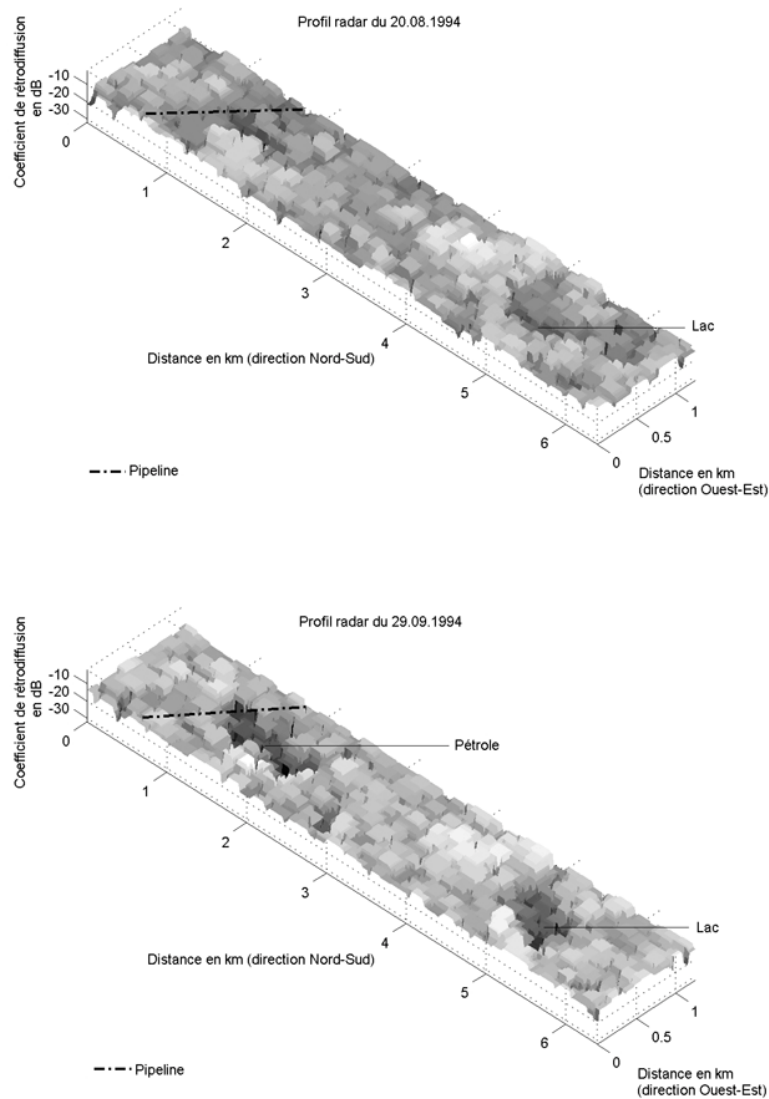
3.3 Filtrage des images radar

Les images prétraitées doivent être soumises à un traitement qui va réduire le bruit résiduel, mis en évidence sur les profils, sans toutefois altérer les contours. C'est pourquoi le filtre de Hamming n'est pas ici appliqué. Nous préférons deux autres méthodes. La première consiste en l'opération d'ouverture soit une *Erosion-Dilatation* qui atténue le bruit et renforce les minima locaux. Ceci nous intéresse car certains d'entre eux relèvent de la présence du pétrole. La seconde consiste en l'opération de fermeture appelée aussi transformation de *Fond de Vallée* soit une Dilatation-Erosion, laquelle réhausse les contours des milieux à faible coefficient de rétrodiffusion. Ces procédures relèvent de la morphologie mathématique (Schmitt et Mattioli, 1993 ; Coquerez, 1995). Les opérateurs de morphologie mathématique sont appliqués dans une fenêtre, appelée élément structurant, qui peut être carrée, rectangulaire ou circulaire et dont les dimensions varient selon l'échelle d'analyse.

Dans le cadre de la première méthode, opération d'Erosion-Dilatation, l'élément structurant retenu après plusieurs tests, est un carré de 9 * 9 pixels. Il s'agit d'effectuer une opération d'ouverture, soit une érosion suivie d'une dilatation. Dans un premier temps, les minima locaux, soit dans la fenêtre 9*9, sont retenus (érosion). Dans un second temps, la fenêtre repasse sur l'image issue de l'érosion et cherche les maxima locaux (dilatation). De la sorte, l'image en sortie comporte les minima lissés et offre l'avantage de n'avoir introduit aucune nouvelle valeur calculée, contrairement au filtre de Hamming.

Figure 5 – Dynamique temporelle autour de l'oléoduc d'après les images radar ERS-1 soumise à une opération d'ouverture (*Erosion-Dilatation*) (Projection UTM zone Nord 40, sphéroïde de Krasovsky)

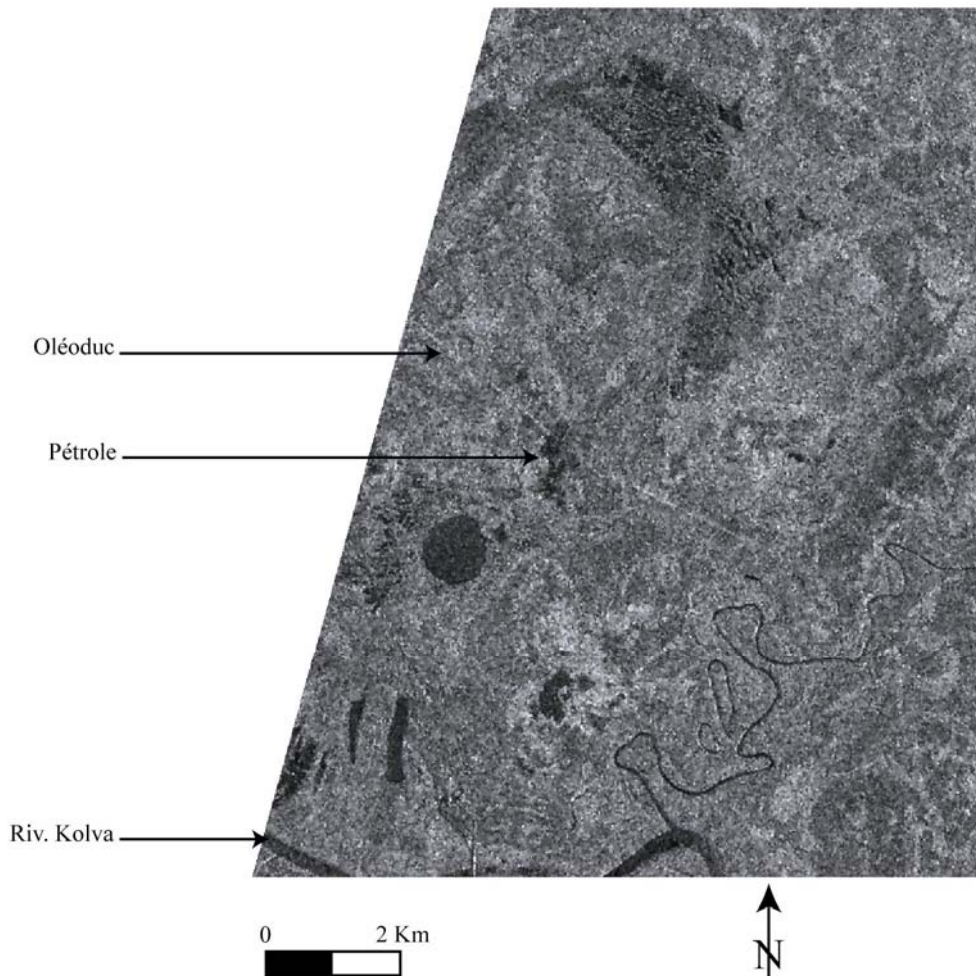




L'ouverture a été appliquée sur l'ensemble de l'image. Une section, le long du profil (6,4 km), a été retenue d'une largeur de 101 pixels, +50 pixels de part et d'autre du profil, soit au total 1,250 km de large (fig. 5). Sur l'image résultante, la cuvette des valeurs associée à la nappe des hydrocarbures ressort nettement. Si cette méthode permet de localiser la nappe de pétrole sans confusion, elle a l'inconvénient de générer une image en sortie qui présente une structure en 'horsts' et 'graben' peu réaliste dont la lecture est désagréable.

Dans le cadre de la seconde méthode, transformation de Fond de Vallée, l'élément structurant retenu après plusieurs tests, est un carré de 3 * 3. Il s'agit d'effectuer une opération de fermeture, soit une dilatation suivie d'une érosion. Dans une première étape, en une extraction des maxima locaux (dilatation) est effectuée. A partir de ceux-ci, les minima sont extraits (érosion). Dans une seconde étape, le résultat est soustrait à l'image initiale. Cette méthode, notamment parce que l'élément structurant est de petite taille, laisse encore beaucoup de bruit mais elle offre un bon complément à la première pour la visualisation de l'ensemble de l'image (fig. 6).

Figure 6 – Image radar ERS-1 du 29/09/94 soumise à une opération de fermeture (transformation en Fond de Vallée)
(Projection UTM zone Nord 40, sphéroïde de Krasovsky)



4 Analyse et discussion

L'épanchement de pétrole d'Usinsk s'est produit suite à la rupture du pipeline reliant Vozey à Usinsk (latitude 66°30'N, longitude 57°20'E, République de Komi, Russie). L'oléoduc, mis en fonctionnement en 1975, traverse les vastes marécages impénétrables de la marge septentrionale de la taïga où le pergélisol est très sporadique et où le manteau neigeux (40-50 cm) subsiste jusqu'au mois de juin. Le conduit non isolé transporte un pétrole chauffé et très corrosif (Marchand, 1999). Ajouté à la corrosion, le pipe est soumis à des affaissements différentiels, créés très ponctuellement tantôt par le soulèvement gélival tantôt par le tassement dû au dégel. Ces deux processus ont conduit à la fissure, puis à la rupture de l'oléoduc. Le pétrole a d'abord été contenu par une digue mais celle-ci a cédé. L'épanchement est survenu entre les mois d'août et de septembre 1994, il n'y avait pas alors de neige. Le site d'abord livré aux observateurs internationaux sous la pression de firmes pétrolières mondiales et des ONG telle Greenpeace, a ensuite été fermé. Par conséquent, des données acquises *in situ*, avant la mise en place d'un couvert neigeux tel que le seuil de pénétration de l'onde radar, en son sein, soit atteint, permettant de conduire la vérité-terrain de nos résultats ne sont pas disponibles. Nous ne présentons ici que des hypothèses sur la dynamique de l'épanchement.

Trois images ERS-1, au format PRI (Precision Image) donc en amplitude, et en 3-vues, avec un espacement inter-pixel de 12,5m et, d'une résolution de 25 m, ont été utilisées. Elles ont été acquises les 3 août, 20 août et 29 septembre 1994. Les images ont subi les prétraitements mentionnés ci-dessus ainsi que les traitements. Sur les profils radar, la nappe de pétrole apparaît nettement par une concavité des valeurs du coefficient de rétrodiffusion. La tache prend naissance à proximité du pipeline et s'étend vers le Sud, en direction de la rivière Kolva. Tandis que le coefficient de rétrodiffusion est de l'ordre de -10 -12 dB aux environs, on enregistre une baisse brutale au passage dans la zone polluée jusqu'à -20 dB. Le polluant abaisse donc en moyenne les coefficients de rétrodiffusion de 7.2 dB. Sur les trois images, les surfaces terrestres présentent une variabilité temporelle de leur rétrodiffusion qui relève des variations de la teneur en eau, de la phénologie du couvert végétal, du vent momentané pour les surfaces d'eau, etc. Ainsi, les coefficients sur le profil des surfaces terrestres varient dans un intervalle de +/-4.7 dB. Le pétrole présente, quant à lui, une grande stabilité temporelle. Sauf en cas de grand vent, sa rétrodiffusion ne varie guère. Cette stabilité des valeurs sur les trois profils, vient assurer l'interprétation.

Sur les images du 3 et du 20 août, la nappe est très circonscrite à proximité de l'oléoduc et n'a pas bougé, certainement encore contenue par la digue, sa superficie a été estimée à 1300 m². Assurément, cette dernière a cédé avant l'acquisition de l'image du 29 août car sur celle-ci, la nappe s'étend sur 1 km vers la rivière Kolva. En admettant que la digue ait cédé le lendemain de la seconde acquisition, soit le 21 août, la nappe aurait progressé de 25 m/jour. Sur l'image du 29 septembre traitée selon la transformation de Fond de Vallée, la superficie de la nappe a été estimée à 2,89*10⁵ m². Cependant, il s'agit de résultats qui sous-estiment les quantifications de l'épanchement. En effet, la détection du pétrole n'est possible que si la présence de celui-ci est suffisante pour atténuer de façon significative la rétrodiffusion du substrat sous-jacent. La diminution du coefficient de rétrodiffusion doit être tel qu'elle ne peut être imputable à la variabilité temporelle des surfaces terrestres.

Finalement, l'exploitation d'images radar ERS-1, acquises à des dates différentes, se révèle être un excellent outil de surveillance du réseau de pipelines et de suivi environnemental. L'exemple d'Usinsk a montré que le filtrage linéaire et les procédures morphologiques sont efficaces pour la détermination des épanchements de pétrole, et du moins, non recouvert de neige, en domaine polaire russe. Cette efficacité est probablement extensible à l'ensemble des espaces septentrionaux. Toutefois, la caractérisation spatiale de la nappe de polluants est limitée en raison de sa dépendance à la résolution spatiale des données satellitales et de la sous-estimation de sa superficie qu'offre la méthode. De plus, une autre limite serait les conditions météorologiques : que les hydrocarbures soient recouverts de neige, *a fortiori* de la neige humide, et la détection devient difficile voire impossible si l'épaisseur du couvert est supérieur à la profondeur de pénétration de l'onde radar dans ce milieu.

La méthode développée ici pour le suivi temporel de l'épanchement de pétrole d'Usinsk pourrait être étendue spatialement et temporellement dans l'optique d'une surveillance du réseau d'oléoducs de la Russie septentrionale. Le mode opératoire serait toutefois contraint par les temps de calculs, la disponibilité et le volume des données images diachroniques. En effet, l'application présentée ici a été réalisée *a posteriori* de la catastrophe, ce qui a permis de sélectionner les images pertinentes et d'extraire de celles-ci des imagerie centrées sur l'épanchement. Dans le cas d'une surveillance c'est l'ensemble du réseau qui doit être représenté sur la base de données images. Le seul moyen de gagner en temps de calcul serait, dans le cadre d'un S.I.G., de limiter les traitements à une bande de terrain de part et d'autre du pipeline, et cela par un opérateur spatial appliqué entre la couche vectorielle *oléoducs* et les couches images. Par ailleurs, une surveillance induit un suivi temporel des différences de réponse radar du substrat. Si le temps réel ne semble ni justifié ni pertinent au regard du

phénomène observé et du coût qu'il implique, l'intervalle de temps doit toutefois être compatible avec la vitesse de propagation d'un épanchement et la variabilité temporelle des effets environnementaux. L'intervalle de temps optimal entre deux observations demeure à définir.

Les perspectives de développement méthodologique de cette analyse sont nombreuses. Sur le plan du traitement d'images, des classifications sont envisageables à partir de l'intégration de la texture et de la variabilité temporelle des milieux. Sur le plan de l'interférométrie radar qui est basée sur la géométrie des images permettant d'accéder à la topographie et ses variations temporelles, avec une résolution verticale de quelques centimètres, on peut imaginer détecter des subsidences provoquées par le réchauffement du pergélisol induit par la présence du pétrole qui absorbe l'énergie solaire. Sur le plan de l'imagerie radar multi-fréquence, en raison de la profondeur de pénétration qui diffère selon la fréquence, on accroît la possibilité de détecter le pétrole en cas d'infiltration dans le sol.

BIBLIOGRAPHIE

- Adragna F., Le Hégarat-Masclé S., Nicolas J.-M., 2000, "Les images du radar à synthèse d'ouverture", *Traitement des images de radar à synthèse d'ouverture*, Paris, Editions Hermès, p. 85-94.
- Allen P., Wilson S., 1995, "NRSC uses ERS-1 SAR data to monitor 1994 Komi oil spill", *Earth Observation Magazine*, n° April, p. 41-43.
- Bernier M., Gauthier Y., Dedieu J.P., 1996, "Interprétation d'une image radar ERS-1 prise en période de fonte au Québec : illustration du phénomène de diffusion dans les hyperfréquences", *Photo-Interprétation*, n° 1996/1, p. 3-7.
- Coquerez J.P., Philipp S., 1995, *Analyse d'images : filtrage et segmentation*, Paris, Editions Masson.
- Fingas M.F., Brown C.M., 1997, "Review of oil spill Remote Sensing", *Spill Science and Technology Bulletin*, vol. 4, n° 4, p. 199-208.
- Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S., Holtzman J.C., 1982, "A model for radar images and its application to adaptive filtering of multiplicative noise", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4(2), p. 157-166.
- Klaus E.E., Tewksbury E.J., 1984, *Liquid Lubricants, Handbook of Lubrication, Theory and Practice of Tribology*, Editions E. R. Booser, CRC Press, Vol. II, p.229-254.
- Lévy E., 1988, *Dictionnaire de Physique*, Presses Universitaires de France, p. 763-764.
- Litovchenko K., Ivanov A., Ermakov S., 1999, "Oil spill detection in the Norwegian Sea using spaceborne SAR imagery", *Proceedings of the 10th Int. Conference on Cold Regions Engineering : Putting Research into Practice*, Lincoln (NH, USA), 16-19 August 1999, p. 374-383.
- Lopès A., Tupin F., Le Hégarat-Masclé S., 2000, "Estimation de la réflectivité et filtrage des images de RSO", *Traitement des images de radar à synthèse d'ouverture*, Paris, Editions Hermès, p. 143-167.
- Marchand Y., 1999, "Industries des hydrocarbures, environnement et télédétection dans le domaine polaire russe", *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 74, n° 3/99, p. 267-274.
- Robin M., 2002, *Télédétection. Des satellites aux SIG (2^{ème} édition)*, Paris, Editions Nathan.
- Schmitt M., Mattioli J., 1993, *Morphologie Mathématique. Logique – Mathématique – Informatique*, Paris, Editions Masson.
- Tupin F., 1997, *Reconnaissance de formes et analyse de scènes en imagerie radar*, Thèse de doctorat en spécialité Signal et images, Ecole National Supérieure des Télécommunications.
- Ulaby F., Moore R., Fung A., 1982, *Microwave remote sensing*, vol. 2, Norwood, Artech House.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K., 1986, *Microwave remote sensing*, vol. 3, Norwood, Artech House.

Wegmüller U., 1990, "The Effect of a Frozen Soil Layer on the Microwave Signatures of Bare Soil", *Remote Sensing of Environment*, n°33, p. 123-135.

Weast R.C., 1981, *Handbook of Chemistry and Physics*, 61st Ed, Boca Raton FL, Editions CRC Press, p. 45.

© CYBERGEO 2004

GAYE A., MARCHAND Y., REES G., Cybergeo , N° 273 , 02 juin 2004