



HAL
open science

Hydrocarbures, environnement et télédétection dans le domaine polaire russe

Yvette Vaguet]-Marchand

► **To cite this version:**

Yvette Vaguet]-Marchand. Hydrocarbures, environnement et télédétection dans le domaine polaire russe . Géocarrefour - Revue de géographie de Lyon, 1999, 74 (3), pp.267 - 274. 10.3406/geoca.1999.4968 . halshs-01779822

HAL Id: halshs-01779822

<https://shs.hal.science/halshs-01779822v1>

Submitted on 27 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Hydrocarbures, environnement et télédétection dans le domaine polaire russe / *Hydrocarbon industries, environment and remote sensing in the polar regions of Russia*

Yvette Marchand

Citer ce document / Cite this document :

Marchand Yvette. Hydrocarbures, environnement et télédétection dans le domaine polaire russe / *Hydrocarbon industries, environment and remote sensing in the polar regions of Russia*. In: Revue de géographie de Lyon, vol. 74, n°3, 1999. Industrie et environnement. pp. 267-274;

doi : 10.3406/geoca.1999.4968

http://www.persee.fr/doc/geoca_0035-113x_1999_num_74_3_4968

Document généré le 11/07/2017

Résumé

La Russie est le premier pays producteur de gaz au monde et le troisième pour le pétrole. Ses réserves exploitées rapidement se situent essentiellement en milieu polaire. La corrosion associée aux processus cryogéniques réduit la durée de vie des pipelines et de nombreux accidents ont été répertoriés. Les pipelines s'étendent souvent dans des zones marécageuses peu habitées et difficiles d'accès. Leur surveillance peut être abordée par le biais de la télédétection, seule à pouvoir fournir des données cinématiques à moindres frais. L'imagerie aérienne est la plus onéreuse mais offre d'excellentes résolutions spatiales et un large choix de capteurs. Les radars présentent un grand potentiel pour l'étude de la topographie et ont l'avantage de pouvoir opérer de nuit et par temps nuageux. Les capteurs optiques restent essentiels pour la surveillance du couvert végétal.

Abstract

Russia is one of the world's largest gas and oil producing countries. Its richest fields occur where permafrost is often present. These fields were rapidly exploited without much environmental concern. Cryogenic processes and corrosion shorten the lifetime of pipelines which are often in swampy and remote areas where access is difficult. The task of monitoring the pipeline requires remotely sensed data. Airborne imagery is more expensive than spaceborne imagery but the latter provides greater choice of sensors and higher spatial resolutions. Radar sensors have shown great potential to study the topography and can operate by night or cloudy weather. Optical sensors are still irreplaceable for vegetation mapping.

Yvette MARCHAND

Université de Rouen

Industries des hydrocarbures, environnement et télédétection dans le domaine polaire russe

RESUME

La Russie est le premier pays producteur de gaz au monde et le troisième pour le pétrole. Ses réserves exploitées rapidement se situent essentiellement en milieu polaire. La corrosion associée aux processus cryogéniques réduit la durée de vie des pipelines et de nombreux accidents ont été répertoriés. Les pipelines s'étendent souvent dans des zones marécageuses peu habitées et difficiles d'accès. Leur surveillance peut être abordée par le biais de la télédétection, seule à pouvoir fournir des données cinématiques à moindres frais. L'imagerie aérienne est la plus onéreuse mais offre d'excellentes résolutions spatiales et un large choix de capteurs. Les radars présentent un grand potentiel pour l'étude de la topographie et ont l'avantage de pouvoir opérer de nuit et par temps nuageux. Les capteurs optiques restent essentiels pour la surveillance du couvert végétal.

MOTS CLES

Hydrocarbures, environnement, pergélisol, télédétection, pipeline, Russie.

ABSTRACT

Russia is one of the world's largest gas and oil producing countries. Its richest fields occur where permafrost is often present. These fields were rapidly exploited without much environmental concern. Cryogenic processes and corrosion shorten the lifetime of pipelines which are often in swampy and remote areas where access is difficult. The task of monitoring the pipeline requires remotely sensed data. Airborne imagery is more expensive than spaceborne imagery but the latter provides greater choice of sensors and higher spatial resolutions. Radar sensors

La marée noire récente sur les côtes françaises ne doit pas masquer que les plus grandes pollutions mondiales d'hydrocarbures ont probablement lieu dans le domaine polaire russe. Ce pays est le premier producteur mondial de gaz et le troisième pour le pétrole. Un tiers de sa production est destiné à l'exportation, notamment vers l'Europe occidentale. Au total, la Russie compte 270 000 km de pipelines reliant les bassins d'hydrocarbures, surtout septentrionaux, aux centres de consommation.

L'exploitation des ressources s'est déroulée vers le Nord dans des milieux de plus en plus contraignants pour l'aménagement et dont la vulnérabilité des écosystèmes va croissant. La préoccupation environnementale fut négligée dans la phase de développement. Elle a commencé à s'imposer d'elle-même après les premiers désastres écologiques. Ces derniers sont imputables à l'histoire d'un développement précipité et aux conditions extrêmes du milieu mettant à rude épreuve les gazoducs et oléoducs. Actuellement, la situation ne semble pas totalement sous contrôle. En raison des conditions difficiles d'accès aux infrastructures au sol, le dispositif de surveillance pourrait avantageusement s'appuyer sur la télédétection pour gagner ce nouveau défi, au service à la fois de l'industrie et de l'environnement.

Cet article retrace l'extension des industries des hydrocarbures vers le cercle polaire russe et au-delà, et les conditions dans lesquelles la préoccupation environnementale a émergé. Dans un deuxième temps, il répertorie les processus naturels conduisant aux ruptures des pipelines. Enfin, il expose les avantages et limites de la télédétection notamment à partir de l'exemple de la catastrophe d'Usinsk.

L'EMERGENCE DE LA PREOCCUPATION ENVIRONNEMENTALE

Durant les années 1960, en dépit de l'hostilité du milieu naturel, l'exploitation des hydrocarbures a connu un rapide essor dans le Nord de la Russie où s'étend le pergélisol. Certains ont parlé de "saccage de la nature russe au nom du marxisme-léninisme [manifestant] une forme particulièrement perverse de l'agressivité de la Raison occidentale et du Progrès" (Mandrillon, 1993). Plus récemment, les industriels ont dû inscrire la préoccupation environnementale dans leur action économique. Dans tout le pays, la montée de l'écologie se calque sur l'histoire des catastrophes dont certaines ont dépassé le cadre national : Tchernobyl (nucléaire, 1986), Usinsk (pétrole, 1994). Celles-ci ravivent chaque fois les sentiments indépendantistes.

Une politique productiviste en milieu hostile

La construction des gazoducs et oléoducs a eu lieu à des rythmes effrénés hérités du stalinisme et du stakhanovisme et encouragés par la course technologique à laquelle se livraient les deux grandes puissances durant la guerre froide. Sur les chantiers, des pancartes encourageaient les ouvriers à travailler toujours plus vite. Le gazoduc reliant Urengoy à Moscou (2 240 km) fut achevé en 22 mois tandis que le Trans-Alaskey, l'oléoduc américain le plus long (1 280 km), fut réalisé en trois ans. Nulle part ailleurs, une exploitation des hydrocarbures à si vaste échelle n'a eu lieu à aussi vive allure, avec autant de gaspillage et si peu de considération pour l'environnement et les populations locales. Les tracés des premiers pipelines privilégiaient les marécages considérés comme de moindre valeur que la forêt boréale. Or, les marais présentent à la fois une exceptionnelle richesse floristique et une grande difficulté d'intervention.

L'exploitation des réservoirs s'est développée vers le Nord dans des milieux toujours plus rudes. L'histoire des bassins gaziers de la Sibérie du Nord-Ouest illustre bien cette progression vers le nord (fig. 1). En 1966, la presse célébra l'effort réalisé et la mise en route du premier gazoduc (Igrim-Punga) dans la plaine de l'Ob où le climat est très continental avec des températures maximales de +35°C en été et minimales de -55°C en hiver. Le pipeline traverse une zone de marécages nombreux et profonds de 4-5 mètres, quadrillée par le fleuve et ses affluents avec un pergélisol discontinu et une couche active profonde de 80 cm. En 1972, l'exploitation du bassin de Medvezh'ye débutait. Il s'étend du sud au nord sur 150 km dans la taïga et la toundra. Les sols contiennent jusqu'à 15% de glace en moyenne dans le nord où des polygones et fentes de glace apparaissent. Dans cette région, les processus cryogéniques sont très répandus, particulièrement dans les nombreux marais. Six ans plus tard, en 1978, le premier gazoduc était posé plus au nord, dans le bassin d'Urengoy où le pergélisol encore discontinu présente parfois une épaisseur de 400 m. La plus grande difficulté résidait alors dans la teneur en glace des sols qui atteint 50% dans les tourbes les plus au Nord. Ce bassin, à lui seul, produit actuellement plus que tous les pays européens réunis et Novyy-Urengoy est une des villes les plus peuplées du Nord de la Russie (90 000 h). En 1983, le premier puits était mis en fonctionnement à Yamburg et, en 1986 s'achevait la mise en place du premier gazoduc. De nos jours, la production (580 millions de m³/jour) talonne celle d'Urengoy. Le réservoir se situe dans la toundra avec un pergélisol continu, épais de 400 à 560 m, et à haute teneur en glace (80-90%). Aujourd'hui, des chantiers sont prévus toujours plus au nord, dans la péninsule du Yamal

avec des traversées d'espaces maritimes (Seligman, 1998).

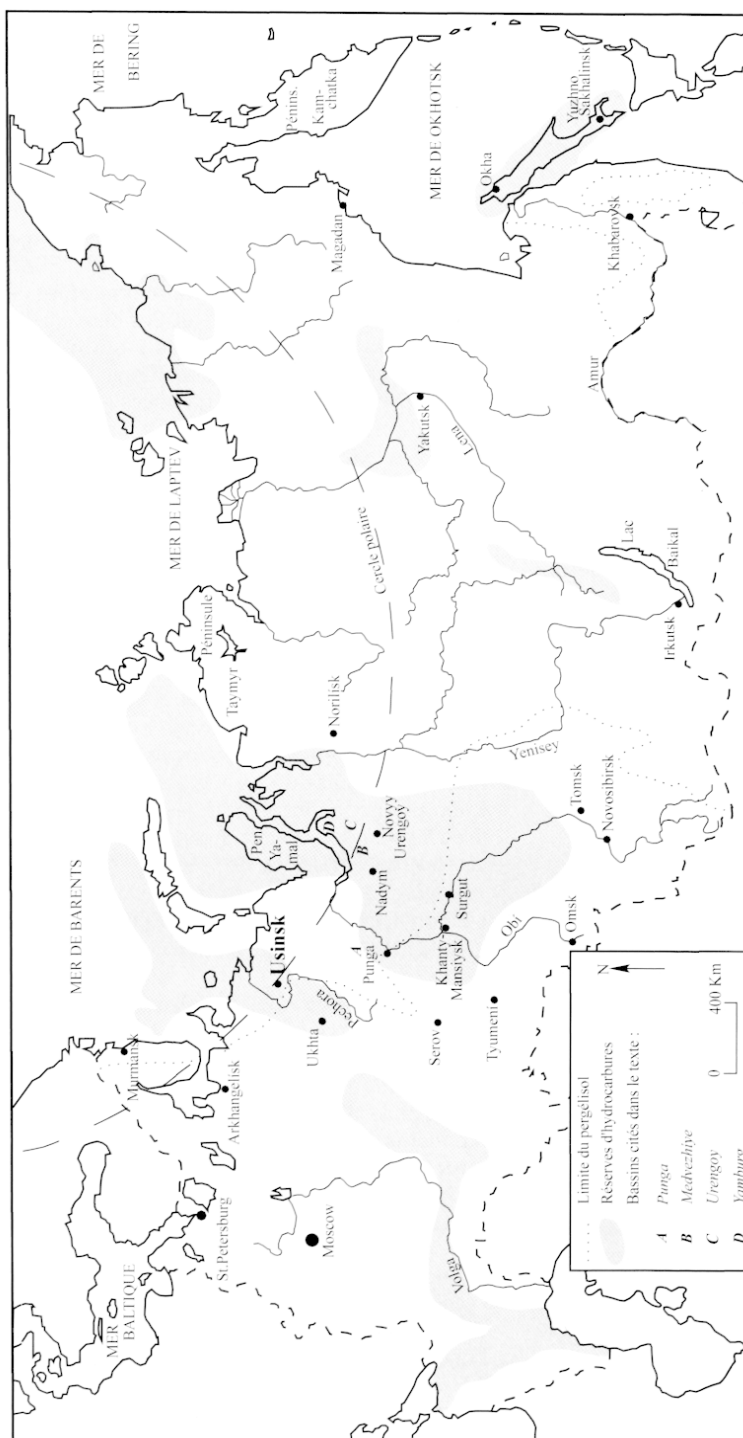
Cette conquête vers le Nord implique un accroissement des distances de transport jusqu'aux centres de consommation situés essentiellement en Europe. Or, les kilomètres supplémentaires se situent en milieux extrêmes où les infrastructures sont soumises à de rudes conditions, augmentant d'autant l'aléa que représente la possible rupture. En outre, les écosystèmes sont plus vulnérables. En effet, alors que la latitude augmente, les temps de réhabilitation après perturbation anthropique s'allongent, essentiellement en raison de l'activité micro-bactérienne qui se trouve réduite par le froid. Le risque pour le patrimoine naturel se trouve accru par cette extension vers le Nord.

La préoccupation environnementale s'impose

L'industrie pétrolière est entrée dans une nouvelle phase de son histoire en 1994 à la suite de la catastrophe d'Usinsk (République de Komi, fig. 1). Les accidents le long de l'oléoduc reliant Vozey à Usinsk étaient nombreux et de plus en plus fréquents : 700 en 1991, 800 en 1992 (Sagers, 1994). Les épanchements accidentels étaient couramment limités par l'érection de simples digues de terre. L'une d'elles a cédé à la fin du mois de septembre 1994 à la suite de fortes pluies, répandant dans la taïga 65 000 tonnes de pétrole brut, soit deux fois plus que lors de la catastrophe d'Exxon Valdez (Alaska, 1989), six fois plus que celle d'Erika (France, 2000). Le chiffre a longtemps été disputé, oscillant entre 14 000 tonnes déclarées par les autorités russes, qui tendaient à minimiser l'événement, et 270 000 tonnes par les observateurs étrangers qui individualisaient mal cet accident dans la longue série (Greenpeace, 1995). La catastrophe fut signalée par une compagnie américaine usagère de l'oléoduc et le *New-York Times* le rapporta au grand public. Les parties russes ont perçu l'attention internationale comme "une provocation bénéficiant à des parties intéressées par le développement industriel du bassin Timan-Pechora" (Sagers, 1994). Quelques compagnies pétrolières occidentales ont des intérêts dans la région mais le marché russe, encore soutenu par le gouvernement, reste difficile à pénétrer.

Les fuites de gaz sont moins visibles, bien que, le 27 avril 1995, l'équipage d'un Boeing 747 survolant la région d'Ukhta (Rép. de Komi) ait signalé une explosion dont les flammes atteignaient 7 500 m d'altitude. La fuite a été estimée entre 4 et 5 millions de m³. Les autorités russes nièrent pourtant l'accident et parlèrent de "routine". A Yamburg, des experts internationaux ont noté un niveau général de fuite de gaz acceptable malgré

Figure 1 : Réservoirs d'hydrocarbures en Russie



have shown great potential to study the topography and can operate by night or cloudy weather. Optical sensors are still irreplaceable for vegetation mapping.

KEY WORDS

Hydrocarbons, environment, permafrost, remote sensing, pipeline, Russia.

d'importantes pertes lors des opérations de maintenance.

Beaucoup d'articles de presse ont décrit l'ampleur de ces catastrophes et ont contribué à révéler la situation environnementale de la Russie où un enfant sur trois souffre de maladie liée à la pollution et où les équipements industriels sont obsolètes et en nombre insuffisant (Pearce, 1993). En Arctique, des incidents surviennent souvent dès les premières années de mise en fonctionnement des infrastructures. Or, la majorité des oléoducs et gazoducs russes a plus de 20 ans. Parmi les 145 000 km de gazoducs de la principale compagnie Gazprom, 30% ont plus de 20 ans, 15% plus de 30 ans et 2,5% plus de 40 ans. Au total, les pertes de pétrole dues aux fuites sont évaluées entre 15 et 30 millions de tonnes par an. Ceci reflète entre autres les rudes conditions du milieu physique auxquelles sont soumises les infrastructures dont la durée de vie est courte.

LES PROCESSUS MORPHOGENIQUES ENDOMMAGEANT LES PIPELINES

Les pipelines sont enterrés, déposés sur le sol ou sur pilotis. Dans les deux premiers cas, le pétrole, dont la teneur en paraffine est souvent élevée, doit être chauffé pour maintenir la fluidité nécessaire à son acheminement. Cet impératif est d'autant plus problématique que les systèmes d'isolation sont inefficaces. Le gaz, lui, est comprimé sur le site d'exploitation avant d'entamer son trajet vers l'Ouest. Cette opération induit une augmentation de sa température à +40°C et les stations de refroidissement, lorsqu'elles existent, ne sont pas satisfaisantes. Les conduits sont soumis au soulèvement gélique, au tassement dû au dégel et à l'érosion thermique associée. Ces processus morphogéniques endommagent les conduits. Le risque de rupture augmente en conséquence.

Le soulèvement gélique

Le soulèvement gélique du sol est un des processus les plus dommageables pour les pipelines. Lors de l'engel, le volume de l'eau augmente de 9% ce qui provoque un gonflement des sols. De plus, la migration de l'eau vers le front de gel (cryosuccion) renforce ce soulèvement. Celui-ci peut atteindre 150 mm en une saison et les perturbations anthropiques l'intensifient par un facteur de 1,5 voire 3. Les pingos sont les reliefs pluriannuels associés les plus remarquables, mais les buttes cryogéniques, reliefs saisonniers de dimension moindre, sont les plus fréquentes.

La force de soulèvement à laquelle est soumis le pipeline peut atteindre 479 kilopascal (Kpa) (Williams, 1989). Au moment du dégel, il revient rarement à sa position initiale et est peu à peu soulevé par un effet de cric. Un soulèvement

moyen irréversible de 20-50 cm après quelques années peut avoir lieu (Seligman, 1998). Les déformations des pipelines peuvent s'étendre sur 8 fois la longueur des reliefs naturels à noyau de glace. Par ailleurs, les silts sont beaucoup plus sensibles au soulèvement gélique que les sables ; après 276 jours de gel en laboratoire, le gonflement des silts et des sables a atteint respectivement 10 et 4 cm (Williams *et al.*, 1992). Or, en Sibérie septentrionale, les conditions cryopédologiques varient sur de courtes distances. La répartition spatiale du processus est donc très inégale, ce qui accroît plus encore la contrainte sur le conduit et donc l'aléa.

La photo 1 illustre ce processus pour les gazoducs du bassin de Yamburg. Le choix de leur tracé minimise l'aléa en évitant par exemple les zones silteuses. La photo 1a montre le paysage de la toundra ponctué de buttes cryogéniques (arrière plan) entre lesquelles s'étirent les gazoducs (premier plan). Cependant, il arrive que le soulèvement gélique se produise le long du conduit, tel que le montre au premier plan la photo 1b.

Le tassement dû au dégel

Le tassement dû au dégel est consécutif à la fonte de la glace contenue dans les sols. Ce processus constitue un problème majeur en Sibérie du Nord où les sols présentent une haute teneur en glace. Il est de surcroît amplifié par les activités humaines. La fonte est initiée par le pipeline enterré lorsqu'il est plus chaud que les sols traversés. Un bulbe de dégel se développe année après année et peut atteindre 7 m voire 10-15 m à la sortie des stations de compression où les températures du gaz sont maximales. Le premier stade de ce dégel s'exprime en surface par l'apparition d'eau stagnante et une modification des espèces végétales. Le pipeline devient peu à peu visible, souligné par une bande marécageuse où mousses et lichens font place à des formations à linaigrettes (*Eriophorum* sp.) caractéristiques des marais (photo 2a).

Ce processus ne présente pas en soi une grande menace pour l'infrastructure, laquelle n'est soumise à aucune force. Toutefois, il est souvent accompagné d'autres phénomènes tels le thermokarst et l'éjection gélique du conduit. Ce dernier finit par "flotter" dans le mollisol liquéfié (photo 2b). Dès lors, la corrosion s'accélère, la fiabilité du pipeline diminue et l'aléa augmente. En Russie septentrionale, 400 km de gazoducs se trouvent en surface de dépressions thermokarstiques (Seligman, 1998). Par ailleurs, le conduit exposé à l'air ambiant est soumis à des écarts de température beaucoup plus importants que lorsqu'il se trouve enterré à 2 m de profondeur dans le sol. Cette exposition peut générer des fissures de contraction thermique.

L'accès aux pipelines et leur surveillance sur le terrain sont limités. En hiver, la longue nuit polaire (18h à Usinsk et 20h à Yamburg) et les températures (entre -40 et -50°C à Yamburg) imposent de lourdes contraintes. Pourtant, les excavations nécessaires à la mise en place des conduits (tranchées, forages pour les pilotis) doivent être réalisées durant cette saison afin d'assurer une reprise en gel des sols avant la fonte de la couche active. En été, les marécages rendent l'accès difficile, voire dangereux. En outre, il est interdit de traverser la toundra en été avec des véhicules lourds qui sont les seuls à offrir une complète sécurité. Au mieux, il n'y a donc qu'une inspection annuelle du réseau. L'utilisation de la télédétection pourrait par conséquent compléter avantageusement le dispositif de surveillance au sol.

LA CATASTROPHE D'USINSK : DE L'USAGE DE LA TELEDETECTION

L'oléoduc de 55 km reliant Vozey à Usinsk (Rép. de Komi) fut mis en fonctionnement en 1975. Il traverse les 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 très corrosif et chauffé (Vilchek et Tishkov, 1995). Les affaissements différentiels et la corrosion ont conduit à la fissure puis à la rupture de l'oléoduc en 1994.

L'usage de la télédétection est peu développé pour l'étude des contaminations des terres émergées. Le type de plate-forme, le capteur utile et la saison la plus appropriée doivent être considérés selon les objectifs : cartographie du réseau de pipelines, repérage de la fuite, surveillance du couvert végétal et de la topographie dans les zones où l'aléa est important, ou bien qui sont en cours de réhabilitation.

La cartographie des pipelines et le repérage d'un accident.

Les cartes de la Russie sont difficilement accessibles et mentionnent rarement les installations sensibles, y compris industrielles, pour des raisons délibérées ou simplement parce qu'elles sont postérieures aux documents cartographiques. Ainsi, le premier intérêt de la télédétection est de fournir des cartes récentes et fiables.

Les infrastructures surélevées sont bien visibles sur un manteau neigeux par imagerie optique et radar. C'est ce que montre l'image optique Spot-Panchromatique de la photo 3 pour l'oléoduc Vozey-Usinsk. Mais l'utilisation de l'imagerie optique est réduite en milieu polaire car elle requiert l'énergie solaire et un ciel dégagé. A



Photo 1a : Butte cryogénique



Photo 1b : Butte cryogénique au premier plan à droite soulevant le gazoduc.

l'inverse, les capteurs actifs, tels les radars, qui émettent le rayonnement dont ils enregistrent le signal de retour, peuvent être utilisés de nuit comme de jour et par tous types de temps. Ceci leur confère un grand intérêt malgré la complexité des données. En été, le couvert végétal rend la tâche plus délicate. Cependant, c'est la seule saison où les conduits enterrés et leur bulbe de dégel peuvent être repérés. La figure 2 montre le même oléoduc sur des images du radar Ers1-SAR durant l'été 1994, au moment de la fuite. L'installation a été remplacée et la nouvelle section est tantôt enfouie dans le sol tantôt surélevée.

Le gaz génère une pollution atmosphérique dont souffre l'écosystème environnant, mais le contaminant lui-même n'est pas repérable par télédétection. Le pétrole et le gaz condensé se répandent en surface et polluent directement sols et végétaux. Les ultraviolets sont absorbés par les hydrocarbures et réémis entre 400 et 650 nm par fluorescence. Les lasers, capteurs actifs, se sont avérés très efficaces pour cette tâche. Les plus couramment utilisés opèrent entre 300 et 355 nm. (Fingas et Brown, 1997 ; Deneke *et al.*, 1975).

Le pétrole est repérable par télédétection optique (visible et infrarouge) et radar (micro-ondes



Photo 2a : *Eriophorum* sp. associé à un bulbe de dégel visible en surface.



Photo 2b : Gazoduc autrefois enterré

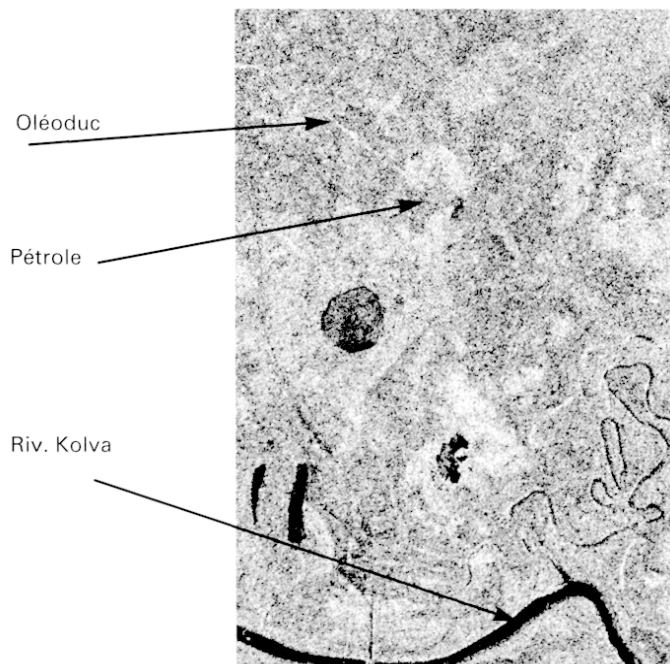


Photo 3 : Oléoduc Vozey-Usinsk (image Spot en mode Panchromatique le 3 /6/1993)

notamment à 0,8 cm (Wegmüller, 1990). Toutefois, il peut être confondu avec un plan d'eau dont la signature spectrale et la faible rugosité sont similaires (Taylor, 1992 ; Allen et Wilson, 1995). Seule une étude multitemporelle peut lever l'ambiguïté (Marchand et Rees, 1999). Par exemple, la figure 4 montre l'extension de la nappe de naphte le long de l'oléoduc d'Usinsk entre août et septembre tandis que les lacs alentour restent identiques.

Cependant, il est rare de pouvoir observer la nappe car le contaminant s'infiltré rapidement dans le sol ; 7 600 l en une heure à Fairbanks en Alaska (Collins *et al.*, 1994). Or le pergélisol est relativement imperméable et le pétrole peut alors stagner à son interface avec la couche active (Biggar *et al.*, 1998). Déjà infiltré, l'hydrocarbure reste théoriquement détectable à l'aide des ondes radar (Rees, 1999).

A la surface de la mer, une nappe de pétrole très mince (inférieure à 70 mm) est invisible dans l'optique (Fingas et Brown, 1997). Plus épaisse, elle tend à apparaître dans la première partie du spectre infrarouge thermique (entre 3 et 5 mm) plus chaude durant le jour et plus froide durant la nuit que l'eau environnante (Bolus, 1996). Dans les micro-ondes, elle se distingue par son effet réducteur des vagues de surface. Le vent idéal pour la repérer est de 1,5 à 6 m/s (Fingas et Brown, 1997) et dans tous les cas ne doit pas dépasser 13 m/s (Litovchenko *et al.*, 1999). La bande X (2,8-5,8 cm) donne les meilleurs résultats.

Les variations de la topographie et du couvert végétal

Le pergélisol n'est pas visible directement par télédétection. Cependant, il a été cartographié, ainsi que la profondeur de la couche active, avec une précision respective de 75% et de 25 cm, en combinant la végétation extraite de données du satellite Landsat-TM et la topographie incluant l'exposition des pentes (Morrissey, 1988). La dégradation du pergélisol peut parfois se traduire par une augmentation de la profondeur de la couche active pouvant conduire à une subsidence (Collins, 1983 ; Seburn et Kershaw, 1997 ; Collins *et al.*, 1994). Les impacts écologiques diffèrent surtout selon le type de carburant, la saison de l'épandage et les perturbations antérieures.

La stéréographie aérienne ou satellitale offre une précision altitudinale respective de 1 et 10 m au mieux. Cette résolution est insuffisante pour étudier les variations topographiques le long des pipelines (soulèvement gélival, tassement dû au dégel et subsidence). L'interférométrie radar est très récente et offre une résolution verticale de quelques centimètres. Elle a été utilisée pour la surveillance de volcans et de l'affaissement

d'anciennes mines de charbon (Wright et Stow, 1999), mais pas encore pour les modelés périglaciaires. Dans le cas d'Usinsk, aucune subsidence n'a été reportée et le site est aujourd'hui fermé. Ces difficultés d'accès limitent les possibilités de mener une telle investigation. De plus, la destruction du couvert végétal empêche l'application de la méthode de L.A. Morrisey citée plus haut.

Les espèces végétales réagissent différemment face au contaminant. Les mousses et les lichens meurent immédiatement et leur réimplantation est extrêmement longue, voire inexistante. Les arbres réagissent sur une plus longue durée. A Fairbanks (Alaska), la mort des épinettes noires a été enregistrée durant 4 à 15 années après l'épandage de pétrole (Collins *et al.*, 1994 ; Hutchinson, 1984). Les arbustes tels les bouleaux et les saules, se régénèrent assez bien. Enfin certaines espèces (*Eriophorum vaginatum*) présentent une haute tolérance et peuvent même proliférer. La cartographie de la végétation à partir d'images optiques est employée depuis longtemps. Elle est fondée surtout sur le rouge, où la végétation absorbe, et le proche infrarouge, où elle réfléchit. L'indice de végétation (NDVI), un rapport normalisé entre ces deux canaux, est souvent utilisé afin de rendre compte de l'état sanitaire du couvert végétal. Or, cet indice est mal adapté aux milieux polaires et l'investigation par espèce est

préférable car la biodiversité est largement mise en cause (Rees *et al.*, 1998). L'étude de la flore par des images radar reste peu explorée et peu détaillée (Tansey *et al.*, 1999).

La figure 2 représente la région d'Usinsk. Les données du couvert végétal ont été extraites d'une image optique (quick-look Spot-XS) du 17 juillet 1994 et reflètent ainsi son état sanitaire au moment du désastre. L'oléoduc et son point de rupture ont été localisés sur l'image radar (Ers1-SAR) acquise le 29 septembre. Il apparaît clairement que les marécages de Khatayakha et de Bezymianny étaient déjà contaminés. La rupture s'est produite dans la région de Pal'nik Shor qui restait à ce moment-là encore peu affectée ; soixante-neuf hectares furent souillés, alors que le pétrole brûlé sur place provoquait une pollution atmosphérique notable. En avril 1996, 60 ha avaient été nettoyés. Des expériences de réhabilitation du couvert végétal avaient été menées avec succès, utilisant des fertilisants et des nouvelles espèces au développement rapide. Parfois, la réhabilitation naturelle fut préférée dans les sites marécageux les plus sensibles et les plus inaccessibles où une intervention aurait pu être encore plus dommageable. Cependant, la perte en termes de biodiversité naturelle est grande et certainement irréversible.

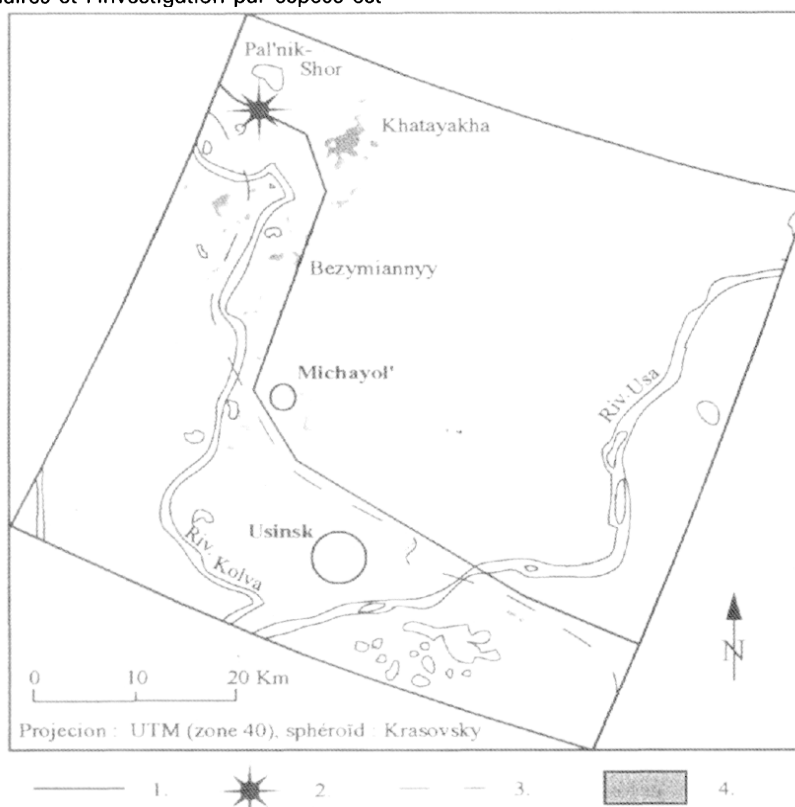


Figure 2 : Oléoduc Vozey-Usinsk - la situation lors de la rupture de l'oléoduc

1. Oléoduc
2. Point de rupture
3. Route principale
4. Couvert végétal détruit

Conclusion

La conquête des réserves d'hydrocarbures vers le Nord implique une augmentation conjointe de l'aléa imputable aux rudes conditions naturelles, et de la vulnérabilité des écosystèmes dont les temps de régénération sont allongés par le froid. La conséquence est l'accroissement du risque pour le patrimoine naturel et les populations locales même si celles-ci sont peu denses. La télédétection représente une aide à la surveillance du réseau de pipelines de la Russie du Nord, compte tenu de son immensité, de son état de fiabilité et des difficiles conditions de travail sur le terrain. La résolution des données est bien adaptée à la cartographie du réseau, étape préalable indispensable. Le repérage d'une pollution, directement ou par le biais du couvert végétal, ne représente aucune difficulté bien que des petites fuites peuvent passer inaperçues. L'étude des impacts écologiques à court, moyen et long termes sur la biomasse est envisageable sur des images optiques. Celle des dégradations du pergélisol reste encore à explorer par l'imagerie radar. Mais la mise en place de la télédétection comme complément se trouve limitée par le coût financier, pourtant moindre que le contrôle systématique à pied.

Du point de vue environnemental, à la fragilité des écosystèmes dont la régénération est lente voire la réhabilitation impossible en termes de biodiversité, s'ajoutent les effets sur la santé des hommes. A Usinsk, les habitants se sont plaints du goût de pétrole de leurs poissons pêchés dans la rivière Kolva. Du point de vue économique, l'industrie des hydrocarbures en Russie du Nord souffre d'un manque de financement nécessaire à sa modernisation et le remplacement des pipelines les plus âgés est souvent inabordable. Le coût de la décontamination ne peut être supporté par les seuls industriels et le gouvernement d'un pays en difficulté financière. Le remplacement de l'oléoduc d'Usinsk a coûté 99 millions de dollars, payés par la Banque Mondiale et la Banque Européenne pour le Développement et la Reconstruction. Du point de vue politique, les industriels et le gouvernement russes se heurtent aux réactions identitaires, voire indépendantistes, des populations locales qui s'exacerbent à chaque accident. Ces acteurs doivent aussi négocier avec les observateurs, partenaires et bailleurs de fonds internationaux dont la pression n'est jamais totalement désintéressée dans une région où se trouvent de grandes réserves mondiales d'hydrocarbures, les plus grandes pour le gaz.

BIBLIOGRAPHIE

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.

BIGGAR K.W., HAIDAR S., NAHIR M., JARRET P.M., 1998, Site investigations of fuel spill migration into permafrost, *Journal of Cold Regions Engineering*, 12, 2, p. 84-104.

BOLUS R.L., 1996, Airborne testing of a suite of remote sensors for oil spill detection on water, *Proceedings of 2nd Int. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, San Francisco (USA), June, p. 24-27.

COLLINS C.M., 1983, Long-term active layer effects of the crude oil spilled, Interior Alaska, *Proceeding of the fourth International Conference on Permafrost*, Washington, p. 175-179.

COLLINS C.M., RACINE C.H., WALSH M.E., 1994, The physical, chemical and biological effects of crude oil spills after 15 years on a black spruce forest, Interior Alaska, *Arctic*, 47, 2, p. 164-175.

DENEKE F.J., MCCOWN B.H., COYNE P.L., RICKARD W., BROWN J., 1975, *Biological aspects of terrestrial oil spills-USA CRREL Oil Research in Alaska, 1970-1974*, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Report 346, 66 p.

FINGAS M.F., BROWN C.E., 1997, Review of oil spill Remote Sensing, *Spill Science and Technology Bulletin*, 4, 4, p. 199-208.

GREENPEACE, 1995, *Greenpeace Campaign Report*, March, 20.

HUTCHINSON T.C., 1984, *Recovery of Arctic and sub-Arctic vegetation nine summers after crude and diesel oil spills. North of 60*, Ottawa, Department of Indian Affairs and Northern Development, Environmental Studies, 22.

LITOVCHENKO K., IVANOV A., ERMAKOV S., 1999, Oil spill detection in the Norwegian Sea using spaceborne SAR imagery, *Proceedings of 10th Int. Conference on Cold Regions Engineering : Putting Research into Practice*, Lincoln (NH, USA), 16-19 August, p. 374-383.

MANDRILLON M.H., 1993, Russie : rapport à la nature et quête d'identité, in BOURG D., *Les sentiments de la nature*, Ed. La Découverte, coll Essais, p. 162-174.

MARCHAND Y., REES G., 1999, Remote Sensing and GIS for oil contamination of frozen terrain application, *Proceedings of 10th Int. Conference on Cold Regions Engineering : Putting Research into Practice*, Lincoln (NH, USA), 16-19 August, p. 363-373.

MORRISEY L.A., 1988, Predicting the occurrence of pergélisol in the Alaskan discontinuous zone with

satellite data, *Proceedings of 5th International Permafrost Conference*, p. 213-217.

PEARCE F., 1993, The scandal of Siberia, *New Scientist*, 27 November, p. 28-33.

REES W.G., 1999, Remote sensing of oil spills on frozen ground, *Polar Record*, 35, 192, p. 19-24.

REES W.G., GOLUBEVA E.I., WILLIAMS M., 1998, Are vegetation indices useful in the Arctic ? *Polar Record*, 34, 191, p. 333-336.

SAGERS M.J., 1994, Oil spill in Russian arctic, *Polar Geography and Geology*, 18, 2, p. 95-102.

SEBURN D.C., KERSHAW G.P., 1997, Changes in the active layer of a subarctic right-of-way as a result of a crude oil spill, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 34, 12, p. 1539-1544.

SELIGMAN B., 1998, *Key factors influencing the reliability of trunk gas pipelines in the West Siberian North*, PhD thesis, University of Cambridge, 288 p.

TANSEY K., LUCKMAN A., SCHMULLIUS C., 1999, Mapping boreal forest in Siberia with ERS SAR interferometry, *Proceedings of 25th Annual*

Conference and Exhibition of the Remote Sensing Society, 8-10 September, Cardiff (UK).

TAYLOR S., 1992, 0.45 to 1.1 mm spectra of Prudhoe crude oil and of beach materials in Prince William Sound, Alaska, *Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report*, 5.

WILLIAMS P.J., RISEBOROUGH D.W., SMITH M.W., 1992, The France-Canada joint study of deformation of an experimental pipe line by differential frost heave, *Proceedings of 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference*, 14-19 June, San Francisco (USA), p. 40-45.

WILLIAMS P.J., 1989, *Pipelines and Permafrost*, Carleton University Press, Ottawa, 125 p.

VILCHEK G.E., TISHKOV A.A., 1995, Usinsk oil spill : environmental catastrophe or routine event, In *Proceedings of Disturbance and Recovery in Arctic Lands - An Ecological Perspective*, Crawford Ed.

WEGMÜLLER U., 1990, The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil, *Remote Sensing of Environment*, 33, p. 123-135.

WRIGHT P., STOW R., 1999, Detecting mining subsidence from space, *International Journal of Remote Sensing*, 20, 6, p. 1183-1188.

adresse de l'auteur

Maître de Conférences
UPRESSA 6063
Département de Géographie
Université de Rouen
76 821 Mont Saint-Aignan
Cedex
Tel : 02 35 14 62 39
Fax : 02 14 62 00
E.Mail :
marchand@osiris.univ-rouen.fr