

LE «PUZZLE» DE LA BANQUISE ARCTIQUE VUE PAR LE RADAR DU SATELLITE ERS-1

Claude **KERGOMARD***

RÉSUMÉ Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) à bord du satellite européen ERS-1 est le premier outil de télédétection permettant d'analyser simultanément la distribution des types de glaces de mer dans l'Arctique en relation avec leur dynamique.

ABSTRACT The Synthetic Aperture Radar on board the ERS-1 European satellite is the first remote sensing tool able to sense simultaneously the ice type distribution and dynamical processes of the Arctic pack ice, and to study their relationships.

ZUSAMMENFASSUNG Der Synthetic Aperture Radar (SAR) vom ERS-1 europäischen Fernerkundung Satelliten macht es zum ersten Mal möglich die Meereisbewegung und Eistypen in den Arktischen Packeis gleichzeitig zu untersuchen

• ARCTIQUE • DÉRIVE DES GLACES • GLACES DE MER • RADAR À SYNTHÈSE D'OUVERTURE (SAR) • TÉLÉDÉTECTION

• ARCTIC • ICE DRIFT • REMOTE SENSING • SEA ICE • SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR)

• ARKTIS • EISDRIFT • FERNERKUNDUNG • MEEREIS • SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR)

En 1990, dans un article de cette revue, M. Griselin a décrit, en se fondant sur son expérience vécue, et interprété en termes de «paysages», le puzzle constamment en mouvement que constitue la banquise permanente de l'océan Arctique. Progressant à pied, à ski ou à bord d'un brise-glace, au niveau de la mer, l'observateur situé sur le «terrain», ressent ou enregistre le contraste entre les **floes** de **vieille glace**, épaisse, couverte de neige et à la surface plus ou moins accidentée, les vastes zones tampons de **glace jeune** peu épaisse, les **chenaux** d'eau libre ou tout juste regelés et couverts d'une couche fine de **glace nouvelle**. Il constate le mouvement de la banquise par l'intermédiaire de l'ouverture ou de la fermeture des chenaux, de la compression qui aboutit à la formation des innombrables **crêtes de pression** qui sont le cauchemar du voyageur de l'Arctique. Faute d'un moyen d'observer l'organisation spatiale et l'évolution temporelle de ce puzzle, il n'a, à aucun moment, la possibilité de se situer réellement dans ce paysage changeant et de maîtriser son déplacement ou sa recherche.

Le **radar à synthèse d'ouverture** (SAR) installé sur orbite à bord du satellite européen ERS-1 depuis juillet 1991 est le premier outil qui permet, de façon quasi opérationnelle, de surmonter cette impuissance et de cartographier le domaine en perpétuelle évolution de la banquise arctique, y compris dans



L'océan glacial Arctique

* UFR de Géographie et d'Aménagement, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve-d'Ascq.

ses aspects dynamiques. Aveugles durant la longue nuit polaire, comme le sont également les moyens de reconnaissance aérienne, et aussi pendant les très fréquentes périodes nuageuses, les capteurs traditionnels de télédétection utilisant les longueurs d'ondes optiques sont en effet d'une utilité très réduite au-dessus des océans polaires. Les radiomètres mesurant le rayonnement infrarouge et micro-ondes émis par la surface de la banquise, à bord de satellites météorologiques, sont d'une plus grande utilité mais leur résolution spatiale est bien trop faible pour distinguer la plupart des floes et des chenaux; leur utilité réside surtout dans la cartographie répétitive, à petite échelle, de l'extension des glaces (Kergomard, 1990) et parfois dans l'observation du mouvement d'ensemble de la banquise (Kergomard, 1989). Disposant d'un nombre important d'images SAR d'ERS-1 fournies par l'Agence Spatiale Européenne (1) et couvrant un domaine proche de celui qu'a parcouru en 1986 M. Griselin, c'est-à-dire le bassin eurasiatique de l'océan Arctique (bassin de Nansen) au nord de l'archipel du Svalbard, sont présentés ici les premiers apports de ces images, dont une exploitation plus complète est en cours, en matière de cartographie des types de glace et de suivi de leur mouvement.

L'imagerie radar du satellite ERS-1

Le radar à synthèse d'ouverture d'ERS-1 est un capteur actif qui émet latéralement, sous forme d'impulsions de forte intensité, un rayonnement dans le domaine des hyperfréquences ou micro-ondes (bande C: fréquence 5,3 GHz ou longueur d'onde 5,7 cm) et mesure en retour le rayonnement rétrodiffusé par la surface de la glace ou de l'océan; le rayonnement est reçu à la surface sous un angle de 23° par rapport à la verticale. À cette longueur d'onde, le rayonnement est totalement insensible aux phénomènes atmosphériques, y compris les nuages, ce qui est le plus grand avantage de ce type de capteur.

Le radar est conçu, grâce à la technologie de synthèse d'ouverture (2), pour fournir des images couvrant une surface de 100 x 100 km avec une résolution spatiale réelle de 20 m environ. Au cours d'un pré-traitement effectué dans ce cas en Grande-Bretagne, les données numériques complexes (au sens mathématique du terme) sont transformées en une image de précision composée de 8000 x 8000 pixels. Pour limiter les temps de calcul informatique, et réduire l'importance du «bruit» résiduel inhérent à la technique radar (*speckle*), les traitements, dont les résultats sont présentés ici, sont effectués sur des images réduites à 1000 x 1000 pixels par le calcul de la valeur médiane dans chaque ensemble de 8 x 8 pixels; la résolution spatiale de 100 m à laquelle on aboutit ainsi est largement suffisante pour les applications.

L'orbite du satellite ERS-1 peut être modifiée par les services de l'Agence Spatiale Européenne en fonction des besoins des différents utilisateurs. Les images (fig. 1 à 3) ont été acquises au cours d'une phase d'exploitation, dite phase «Glace», qui permet d'acquérir des images radar couvrant à peu près totalement les océans polaires selon des orbites qui sont «revisi-

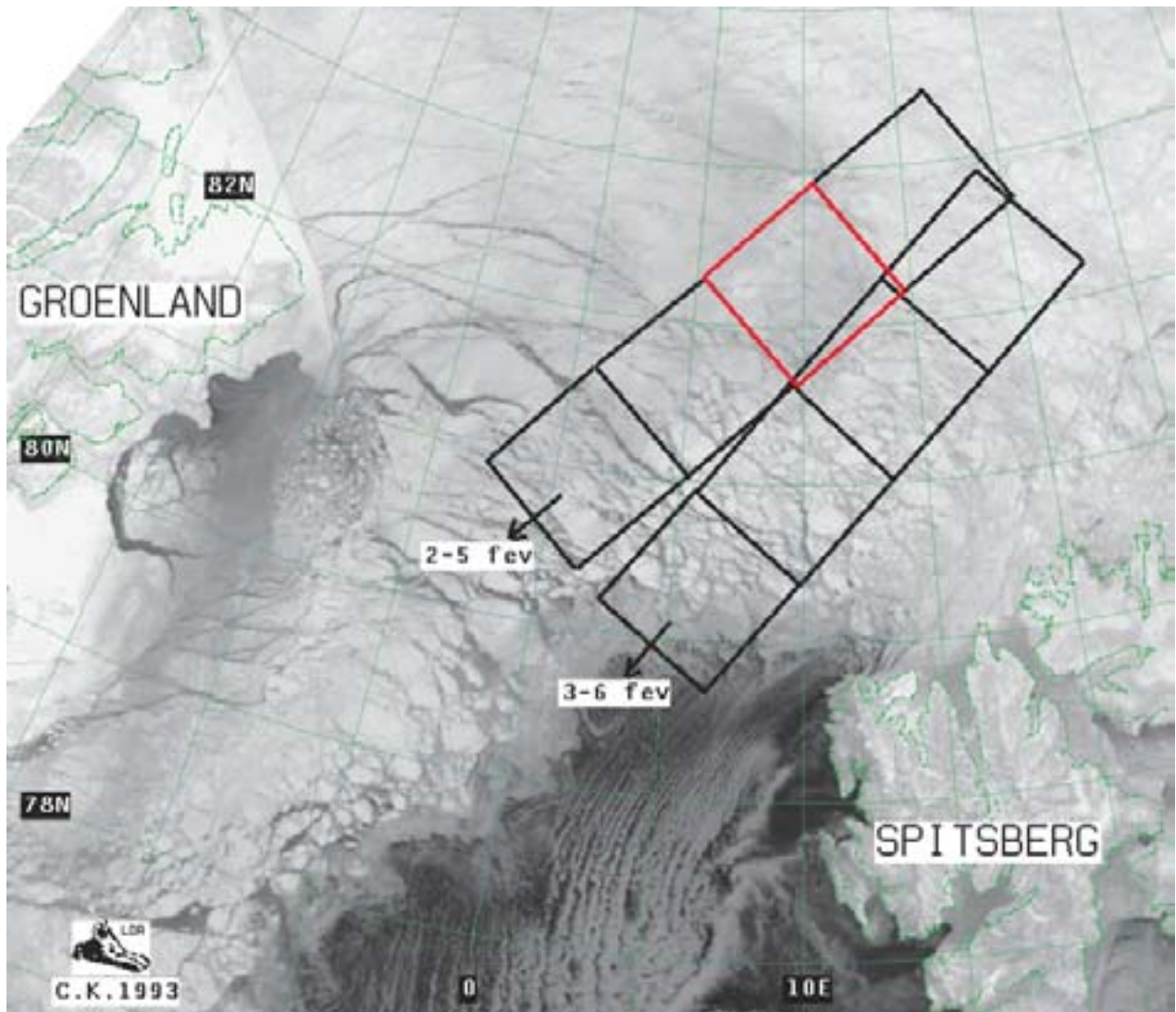
tées» tous les trois jours, cette fréquence étant indispensable au suivi du mouvement de la banquise. Les images sont ainsi extraites de deux orbites voisines, acquises au cours de deux journées consécutives et revisitées trois jours plus tard (fig. 1). La région couverte correspond à l'extrémité du grand courant de la dérive transpolaire qui entraîne vers le détroit du Fram, entre le Groenland et l'archipel du Svalbard, la glace formée en majorité dans les secteurs sibérien et canadien de l'océan Arctique; environ 5000 km³ de glace de mer transite annuellement dans ce détroit. Dans cette région, le mouvement de dérive des glaces — induit comme partout ailleurs dans l'Arctique par la rotation de la Terre, le courant marin et l'action du vent — subit une accélération et la constriction induite par le détroit et la présence du Svalbard, et sans doute aussi les conséquences de la topographie particulièrement complexe du fond marin. C'est à l'étude des conséquences de ces processus sur l'évolution des types de glace et leur mouvement qu'est prioritairement destinée l'imagerie radar.

La discrimination des types de glace

La discrimination des types de glace sur l'image radar (fig. 2) repose avant tout sur l'analyse des variations de l'intensité de la rétrodiffusion du signal émis par le radar (coefficient de rétrodiffusion σ_0) lorsqu'il rencontre les différents types de glace et éventuellement l'eau libre des chenaux. Sur l'image radar, les variations du coefficient de rétrodiffusion apparaissent en niveaux de gris. Les propriétés de la glace de mer qui affectent la rétrodiffusion sont surtout la rugosité de la surface, la salinité et la présence, à l'intérieur de la glace, de bulles d'air ou de poches de saumure (Schuchman et Onstott, 1990). La géométrie de la surface (crêtes de pression et rebords des floes) introduit également, en fonction de l'orientation par rapport à la visée oblique du radar, de fortes variations locales de la rétrodiffusion.

En période hivernale, lorsque les basses températures excluent la présence d'eau de fonte à la surface de la banquise, on peut ainsi distinguer aisément trois grands types de surfaces (Kwok *et al.*, 1992):

- *la vieille glace* polaire, épaisse de 2 à 4 m, a la particularité d'être peu salée, riche en bulles d'air; elle est couverte d'une couche de neige modelée par le vent en *sastrugis* qui donnent une surface «rugueuse» à l'échelle du rayonnement radar. Elle se distingue donc par des valeurs élevées du coefficient de rétrodiffusion et par sa forte variabilité spatiale, qui peut être mise en évidence sur l'image numérique par l'utilisation d'un indicateur statistique de texture tel que l'écart-type.
- *la glace jeune*, d'une épaisseur de 20 cm à 1 m, et parfois *la glace nouvelle*, moins de 20 cm, formée dans les zones tampons et les chenaux fraîchement gelés présente généralement une salinité élevée qui ne permet pas la pénétration du signal radar. La surface est généralement lisse, sauf dans le cas des crêtes de pression qui se forment de façon préférentielle dans ce type de glace. La rétrodiffusion est donc bien plus faible que pour la vieille glace; elle tend à augmenter progressive-



1. Couverture géographique assurée par le radar à synthèse d'ouverture du satellite ERS-1

Couverture assurée au cours de deux orbites contiguës survolées deux jours consécutifs (2 et 3 février 1992) et «revisitées» trois jours plus tard (5 et 6 février 1992). Le tracé en noir montre le découpage des scènes (100 x 100 km) telles qu'elles sont fournies par l'Agence Spatiale Européenne, le tracé en rouge correspond à la scène présentée dans les figures 2 et 3. Ces tracés sont superposés à une image (infrarouge thermique) du satellite météorologique NOAA-11 du 13 février 1992 montrant l'extension et les caractéristiques, à petite échelle, de la banquise dans le détroit du Fram, entre le Groenland, à l'ouest, et l'archipel du Svalbard.

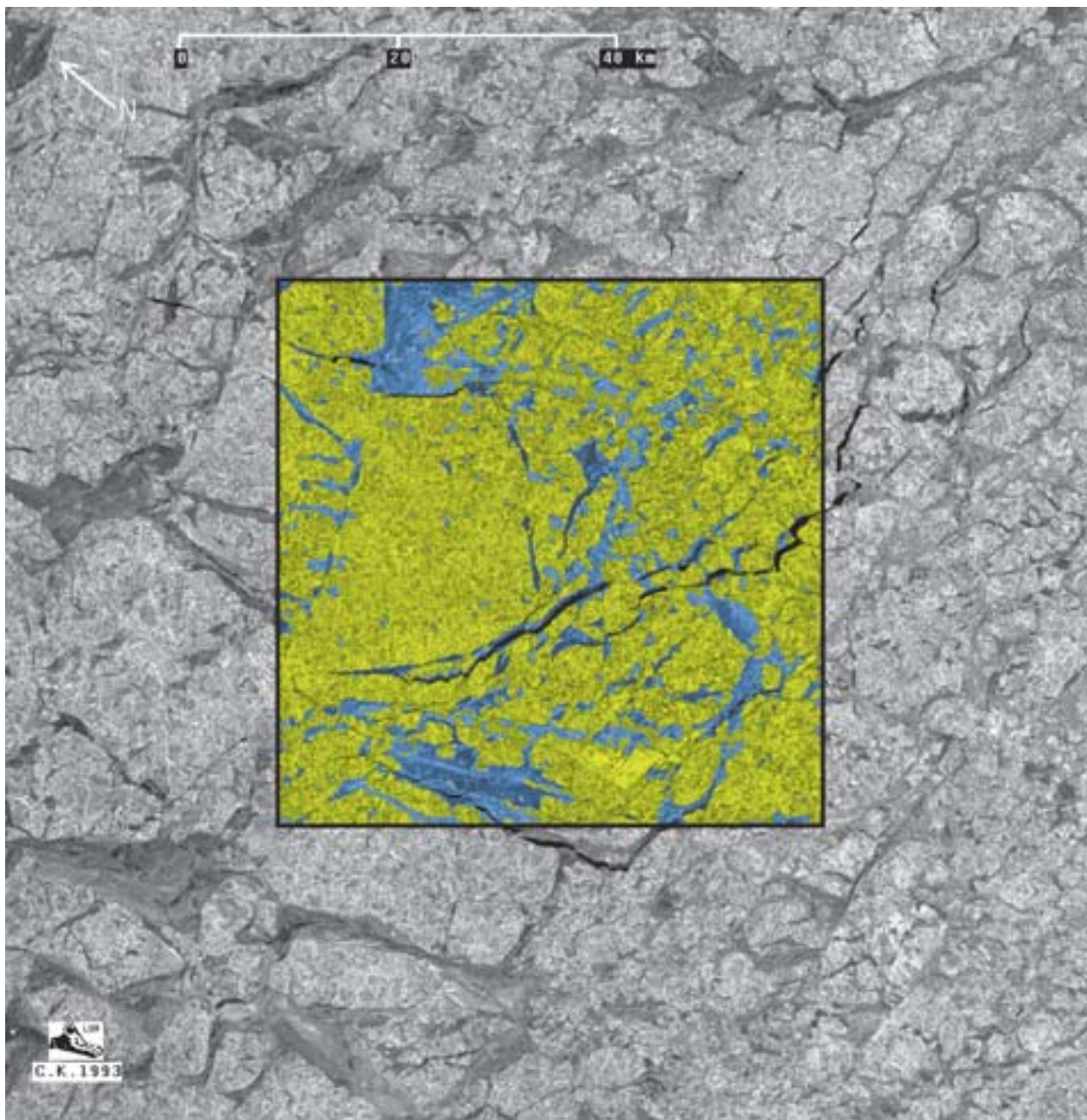
ment avec l'épaisseur de la glace et la diminution de la salinité qui accompagne sa croissance. Elle est également beaucoup moins variable spatialement que celle de la vieille glace.

- *la mer libre*, présente dans les chenaux, se caractérise par une rétrodiffusion quasi nulle, en raison à la fois de sa salinité et de sa surface très lisse. La largeur de la plupart des chenaux présents dans une banquise dense ne dépasse pas quelques centaines de mètres, ce qui est insuffisant pour permettre la formation de vagues. Une très fine couche de glace nouvelle en formation sur les chenaux ne semble pas pouvoir être distinguée de l'eau libre. Sur l'image acquise le 5 février 1992 par environ 82° 30' N et 10° E, il a été ainsi possible (3) de différencier les trois grands

types de surface (vieille glace, glace jeune et mer libre) et d'en mesurer les surfaces respectives. Dans cette région de banquise très compacte, l'eau libre se limite à quelques chenaux ouverts récemment au centre de l'image: la **concentration** de la banquise (rapport de la surface de glace sur la surface totale) est proche de 98%. Un tiers de la surface englacée est constituée de glace jeune, et pour deux tiers de vieille glace polaire.

Le mouvement de la banquise

L'ouverture ou la fermeture des chenaux, la formation de glace nouvelle puis de jeune glace comme celle des crêtes de pression sont un résultat direct du mouvement de dérive de la banquise et de

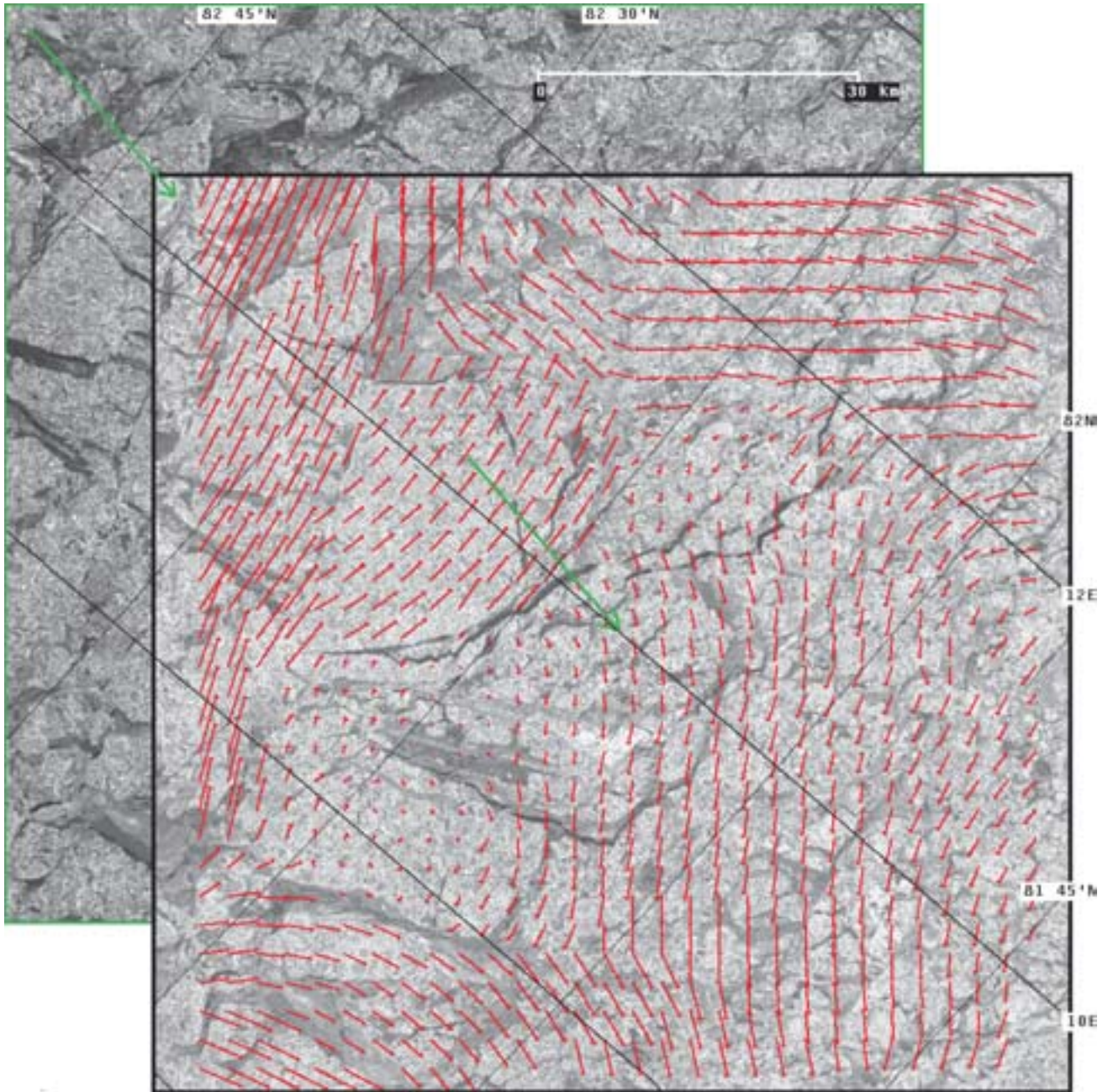


2. Scène radar du satellite ERS-1 (orbite 2916 du 5 février 1992) centrée à 82° 16' N et 10° 04' E

Les niveaux de gris correspondent à la visualisation des valeurs du coefficient de rétrodiffusion radar (après réduction de l'image à 1000 x 1000 pixels). Dans la partie centrale, les couleurs désignent les types de glace: «vieille» glace polaire en jaune, glace annuelle en bleu, eau libre ou nouvelle glace en noir.

la déformation du champ de glace qui en résulte. À partir des couples d'images acquises à trois jours d'intervalle, il est possible d'acquérir visuellement une connaissance de ce mouvement en suivant les floes reconnaissables d'une image à l'autre. Cependant, en raison du nombre d'images à traiter, l'analyse détaillée du mouvement doit être obligatoirement effectuée de façon automatique. La méthode employée (Fily et Rothrock, 1986) consiste à rechercher

la corrélation maximum entre les valeurs d'un ensemble de pixels de la première image («fenêtre») et celle d'une fenêtre correspondante de la seconde image, décalée en lignes et colonnes; le décalage — nombre de pixels en x (nombre de colonnes) et y (nombre de lignes) — mesuré entre les positions des deux fenêtres corrélées définit un vecteur qui représente le déplacement de la glace durant l'intervalle de trois jours qui sépare les deux images radar.



3. Mouvement de la banquise extrait du couple de scènes radar (orbites 2873 du 2 février et 2916 du 5 février 1992) centrées à 82° 16' N et 10° 04' E

Le décalage des deux extraits et la longue flèche (en vert) montrent le mouvement d'ensemble (21 km environ). L'ensemble des petites flèches (en rouge) représente le mouvement différentiel (déformation) du champ de glace pendant l'intervalle de trois jours.

La recherche de la corrélation maximum pour la mesure du déplacement de la glace de mer est une opération coûteuse en temps de calcul, même lorsqu'il est effectué sur une image préalablement réduite à 1000 x 1000 pixels. Aussi, pour établir le champ des déplacements de la glace représenté sur la figure 3, a été choisie une stratégie fondée sur l'augmentation progressive de la résolution spatiale (Fily et Rothrock, 1987):

- la première étape consiste à rechercher visuellement, sur l'écran du système de traitement d'images (4), le déplacement d'une vingtaine de grands floes reconnaissables sur les deux images. On définit ainsi le mouvement d'ensemble qui affecte la banquise polaire dans la région étudiée. Dans ce cas, ce mouvement d'ensemble, induit par la dérive transpolaire et le vent, représente environ 21 km, en trois jours, en direction du sud.

- la recherche automatique des déplacements est ensuite effectuée sur des images réduites par *moyennage* à 111 x 111 puis 333 x 333, et enfin 1 000 x 1 000 pixels. À chaque étape, le domaine de recherche de la corrélation maximum est limité en fonction des résultats de l'étape précédente.
- le champ des vecteurs-déplacements obtenu comporte des mesures aberrantes, en particulier dans les zones où les modifications de la couverture de glace imposées par la compression ou l'ouverture ne permettent pas la reconnaissance des floes après trois jours. À chaque étape, le champ des vecteurs est donc filtré pour éliminer les valeurs aberrantes selon deux critères: le degré de signification de la corrélation obtenue, et la cohérence spatiale du champ de vecteurs: sont éliminés les vecteurs qui présentent un écart trop important avec leurs voisins.

La comparaison entre le champ de vecteurs obtenu et la répartition des types de glaces (fig. 3) illustre de façon précise la relation qui existe entre la morphologie et la dynamique de la banquise polaire dans la région. Les grands floes de vieille glace, épaisse et peu déformable, surtout reconnaissables à l'est, à l'amont de la dérive, se déplacent en grands blocs homogènes. Leur mouvement relatif, une fois déduit le mouvement d'ensemble de la banquise, se traduit généralement par un cisaillement, pouvant atteindre 2 km en trois jours, le long de grandes fractures, et parfois par des rotations. Les plus grandes zones tampons de jeune glace se localisent à la jonction de trois zones homogènes affectées de mouvements différents. Dans la partie sud-ouest de l'image, l'accélération du mouvement de dérive affecte une région de floes plus petits; elle donne naissance à un courant de glace plus concentré et plus rapide qui s'oriente vers le sud-ouest, dans l'axe du détroit du Fram. Enfin, au centre de l'image, l'ouverture de grands chenaux d'eau libre ou de glace nouvelle souligne le domaine de divergence associé à l'accélération de la dérive. Une exploitation plus poussée du champ de vecteurs pourrait permettre une quantification de ces phénomènes de convergence, de divergence ou de cisaillement, et leur relation avec la répartition des types de glace (Fily et Rothrock, 1990).

L'exploitation de l'imagerie radar du satellite ERS-1, telle qu'elle vient d'être présentée, c'est-à-dire encore imparfaite, s'inscrit dans un effort obligatoire de mise au point de méthodes automatiques de réduction de l'information contenue dans les données fournies par les satellites d'observation de la Terre. Il suffit de signaler qu'une seule scène radar couvrant 100 x 100 km représente environ 130 Mo d'information pour comprendre que la production de cartes périodiques (hebdomadaires par exemple) du mouvement de la banquise et de la répartition des types de glace couvrant la totalité de l'océan Arctique, où la seule banquise permanente couvre 7 millions de km², ne saurait passer par une visualisation et une exploitation manuelle des images!

(1) Les données numériques ont été fournies dans le cadre du Programme for International Polar Oceans Research, (PIPOR Science Working Group, 1985) à un groupe de chercheurs français comprenant, outre l'auteur de l'article, J.-Cl. Gascard (Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie, Paris) et M. Fily (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Grenoble). Le traitement réalisé ici a été effectué au Laboratoire d'Optique Atmosphérique, à l'Université des Sciences et Technologies de Lille.

(2) Utilisation de l'effet Doppler induit par le mouvement relatif de la surface et du satellite pour «synthétiser» une antenne longue et permettre une résolution spatiale élevée.

(3) La discrimination est obtenue par des *seuillages* effectués sur la valeur médiane et l'écart interquartile des niveaux de gris (correspondant à la rétrodiffusion) préalablement calculés dans des fenêtres de 8 x 8 pixels, lors de la réduction de l'image (Kergomard *et al.*, 1994).

(4) À cet effet est utilisé le logiciel *SPHINX* mis au point au Laboratoire d'Optique Atmosphérique, à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, sur une station de travail HP.

Références bibliographiques

- FILY M. et ROTHROCK D. A., 1986, «Extracting sea ice data from satellite SAR imagery», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24, n° 6, pp. 849-854.
- FILY M. et ROTHROCK D. A., 1987, «Sea ice tracking from nested correlations», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25, n° 5, pp. 570-580.
- FILY M. et ROTHROCK D. A., 1990, «Opening and Closing of Sea Ice Leads: Digital Measurements from Synthetic Aperture Radar», *Journal of Geophysical Research*, 95, pp. 789-796.
- GRISELIN M., 1990, «Les "paysages" de la banquise», *Mappemonde*, Montpellier, GIP Reclus, n° 2, pp. 27-32.
- KERGOMARD Cl., 1989, «Le mouvement des glaces de mer dans le détroit de Fram d'après les données NOAA-AVHRR», *Photo-Interprétation*, n° 2/5, pp. 49-60.
- KERGOMARD Cl., 1990, «Résolution spatiale et niveaux d'échelle dans l'observation satellitaire des glaces marines», *Photo-Interprétation*, n° 5, pp. 3-7.
- KERGOMARD Cl., GASCARD J.-Cl., FILY M., DELACOURT Ch., LEFORT Ch. et DARR D., 1994, «The transpolar ice drift north of Fram Strait studied from ERS-1 SAR imagery», *Proceedings Second ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment*, Hambourg, 11-14 octobre 1993, ESA SP-361, pp. 263-267.
- KWOK R., RIGNOT E. et HOLT B., 1992, «Identification of sea ice types in spaceborne Synthetic Aperture Radar data», *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 2391-2402.
- PIPOR Science Working Group, 1985, *A Programme for International Polar Oceans Research*, ESA SP-1074, Agence Spatiale Européenne, 42 p.
- SCHUCHMAN R. A., et ONSTOTT R. G., 1990, «Remote sensing of the Polar Oceans», in: Smith, W. O. J^e ed., *Polar Oceanography*, Part A, Physical Science, Academic Press, pp. 123-169.

