Télédétection, 1999, Vol. 1, pp. 95-137
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 1999 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Publié sous licence par
Gordon and Breach Science Publishers
Imprimé en Malaisie

L'interférométrie radar peut-elle contribuer au suivi des risques géologiques ?

LAURENT POLIDORI[ab*] et MICHEL KASSER[bt]

[a]Alcatel Space Industries, B.P. 99, 06 156 Cannes-La Bocca cedex, France et [b]École supérieure des géomètres et topographes, 1, boulevard Pythagore, 72 000 Le Mans, France

(soumis le 18 janvier 1999 ; révisé le 11 mars 1999 ; accepté le 26 avril 1999)

Proposée au milieu des années 1980, l'interférométrie différentielle a rapidement été perçue comme une technique prometteuse pour la détection et la mesure des mouvements de terrain et donc pour le suivi des risques géologiques. À cette époque, les chercheurs manquaient de données pour valider ce concept, mais ERS-1 a, depuis, largement comblé cette lacune, permettant des démonstrations spectaculaires, et la mission tandem ERS1/ERS-2 a permis d'accroître encore le nombre de démonstrations de faisabilité. Aujourd'hui, la faisabilité ne faisant plus de doute, c'est la pertinence opérationnelle de l'interférométrie différentielle qui est en cause. En effet, une application comme le suivi des risques géologiques peut peser très lourd dans la **crédibilité économique d'un programme spatial**. Il était donc important d'évaluer la pertinence de l'interférométrie différentielle, en remplacement ou en complément des techniques existantes, dans le contexte du suivi des principaux risques géologiques que sont les tremblements de terre, les glissements de terrain et les éruptions volcaniques.

L'étude que nous avons menée avec le soutien d'Aérospatiale Satellites (aujourd'hui Alcatel Space Industries) et du CNES dans le cadre du programme AVALSAR se divise en deux parties, où l'interférométrie radar est successivement considérée comme un **instrument de mesure** (évaluation d'une déformation) et comme un **instrument de surveillance** (évaluation d'un risque). La deuxième partie, souvent absente des évaluations de faisabilité, nous a inspiré quelques commentaires sur le rôle et la responsabilité de la communauté scientifique dans les situations de crise.

À l'issue de cette étude, le potentiel de l'interférométrie radar n'est pas remis en cause mais nous demeurons sceptiques quant à la reproductibilité des succès rencontrés dans le cadre de projets pilotes. Nous recommandons de donner une connotation nettement plus opérationnelle aux projets futurs en associant des responsables politiques à toutes les phases.

Dans cet article, notre objectif est donc de dissiper, par une analyse critique de l'état de l'art, les malentendus qui ont conduit une technique prometteuse à ne pas tenir ses promesses, et de formuler quelques recommandations très générales.

Mots-clés: radar; interférométrie; risques géologiques; société; décision

* Tél. +33 4 92 92 78 86; télécopieur +33 4 92 92 76 60; laurent.polidori@space.alcatel.fr
† Tél. +33 2 43 43 31 00; télécopieur +33 2 43 43 31 02; kasser@esgt.cnam.fr

Differential SAR interferometry, which was proposed some 10 years ago, has rapidly been considered as a promising tool for the study and mapping of geological hazards, due to its capability to detect small (i.e. centimetric) terrain deformations, such as those occurring in a landslide or before a volcanic eruption. However, the use of differential interferometry to this kind of application has mostly been limited to feasibility studies, and most attempts to apply this technique in operational conditions have failed. Indeed, the results reported in the literature have often been obtained in very particular conditions, in order to maximize the probability of success – and the failures have not been published.

The study reported in this article has been carried out to explain why this promising tool has such a low probability of success. The analysis is carried out in two steps. On the one hand, as a **measurement instrument**, the ground displacement accuracy depends on several factors (such as spatial and temporal baseline, atmosphere, acquisition geometry...) that are reviewed and analysed. On the other hand, as a **monitoring instrument**, SAR interferometry is compared with other devices (GPS, telemetry, photogrammetry...) not only in terms of accuracy but also in terms of operational implementation (cost, delay, friendliness...), taking into account the challenges of hazard mapping in terms of economical vulnerability and political responsibility. The second step is often excluded when the possibilities of SAR interferometry are evaluated. By including it, we integrate the political constraints of geological hazards mapping in an end-to-end analysis which ranges from the quality of the SAR signal to the constraints of decision processes.

The main conclusion of this study is that a measurement tool cannot be considered as a monitoring tool without careful consideration of the political concepts, such as the experts' responsibility and the social perception of risk. Finally, some recommendations are expressed concerning the way SAR interferometry can support the implementation of more operational measurement techniques.

This study has been supported by Aérospatiale Satellites Center (now Alcatel Space Industries) and by CNES in the frame of the AVALSAR programme.

Keywords: radar; interferometry; georisks; society; decision making

1. ANALYSE DES PERFORMANCES ET CONTRAINTES DE L'INTERFÉROMÉTRIE DIFFÉRENTIELLE

1.1. Rappels : l'interférométrie différentielle, principe et conditions de réussite

L'interférométrie radar consiste à former et exploiter un interférogramme, image des différences de phase entre deux échos radar. On s'intéresse ici au cas où les deux échos ont été acquis par la même antenne au cours de deux passages successifs au-dessus de la même zone. Le déphasage $\Delta\Phi$ est, au premier ordre et localement, proportionnel à l'altitude du terrain. Mais la conversion du déphasage en altitude n'est pas aisée, d'une part parce que $\Delta\Phi$ contient des termes parasites qui affectent la précision du MNT (modèle numérique de terrain ou d'altitude) obtenu, d'autre part parce que l'interférogramme ne donne pas le déphasage absolu mais seule-

ment modulo 2π. Il faut donc "dérouler" les franges d'interférences (de même qu'il faut dérouler une bobine pour connaître la longueur du fil). Toutes ces difficultés ont été décrites en détails dans plusieurs articles de synthèse (Zebker and Goldstein, 1986; Gabriel and Goldstein, 1988; Prati and Rocca, 1990; Massonnet and Rabaute, 1993).

L'hypothèse implicite qui est faite en interférométrie, comme toutes les méthodes stéréoscopiques, est l'immobilité du terrain. Cette hypothèse signifie que les parallaxes sont dues exclusivement à la différence des géométries d'acquisition, les déphasages résultants étant fonction de l'altitude. Or, si le terrain est animé d'un déplacement même infime (typiquement une fraction de longueur d'onde), le déphasage mesuré $\Delta\Phi$ est modifié d'une quantité qui dépend de l'amplitude et de la direction du mouvement:

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \qquad (1)$$

où ΔR est la variation de distance radar-sol entre les acquisitions, c'est-à-dire la projection orthogonale du déplacement absolu sur l'axe de visée. On montrera plus loin que cette projection est une contrainte importante du problème.

Dans le cas général, l'effet du déplacement se superpose à l'effet du relief. On obtient donc, après élimination des franges orbitales, deux systèmes de franges qui se superposent, l'un lié au relief et produit par l'effet de stéréoscopie, l'autre lié aux déformations de la surface. Le déphasage total fourni par l'interférogramme s'écrit donc:

$$\Delta\Phi = (\Delta\Phi)_{\text{relief}} + (\Delta\Phi)_{\text{déplacement}} \qquad (2)$$

Si l'on néglige pour l'instant les déphasages parasites d'origines diverses qui s'ajoutent à ces deux termes, le calcul du déplacement suppose donc que l'on puisse isoler son effet, en retranchant celui du relief. C'est ce que l'on fait en simulant l'interférogramme que l'on obtiendrait sur un terrain non déformé, d'où la nécessité d'une connaissance externe du relief (concrètement : un modèle numérique de terrain), ou d'un deuxième interférogramme (ce qui exige un troisième passage du radar). Dans ce dernier cas, les déphasages observés doivent être normalisés, car la base stéréoscopique apparente, qui intervient dans la relation entre altitude et déphasage, diffère d'un couple à l'autre (Gabriel *et al.*, 1989).

La relation (2) peut s'écrire:

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi B_{perp}}{\lambda R \sin\theta}\Delta z + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \qquad (3)$$

où : B_{perp} est la composante de la base stéréoscopique perpendiculaire à la direction de visée;

λ est longueur d'onde du radar

R est la distance entre le satellite et le terrain;

θ est l'angle de visée par rapport au nadir;

Δz est la hauteur au-dessus d'une référence de déphasage nul (connue grâce au MNT);

ΔR est le déplacement du terrain projeté sur l'axe de visée.

Cette relation montre que la sensibilité de l'interférogramme au relief croît avec la base. Lorsque la base n'est pas trop large, le déphasage total n'est pas trop sensible au relief et l'on peut donc se contenter d'un MNT grossier (voire de pas de MNT du tout si la base est très étroite). Celui-ci permet alors de prédire par le calcul les valeurs de $(\Delta\Phi)$relief avec une assez bonne précision, et donc d'isoler $(\Delta\Phi)$déplacement.

Malheureusement, un MNT même grossier n'est pas souvent disponible et, lorsqu'il existe, son aptitude à l'interférométrie différentielle est difficile à évaluer.

1.2. Inventaire et analyse des facteurs de faisabilité et de performance

Par **faisabilité**, on entend la possibilité d'acquérir les données et d'en extraire un interférogramme présentant un rapport signal sur bruit suffisamment élevé. La notion de **performance** est beaucoup moins intrinsèque puisqu'elle dépend des caractéristiques du phénomène étudié et du type de mesure que l'on souhaite effectuer (nature, précision, périodicité, etc.).

1.2.1. Facteurs technologiques

A. Caractéristiques orbitales

Dans une mission radar interférométrique, les caractéristiques orbitales concentrent plusieurs facteurs clés, qu'il s'agisse de l'orbite nominale, de la base stéréoscopique (ou écart inter-orbital), de la précision avec laquelle ces paramètres sont estimés *a posteriori* ou encore de la possibilité de les

fixer *a priori*. L'orbite détermine en effet des paramètres aussi dimensionnants que la base spatiale (écart entre les orbites), la base temporelle (délai entre deux acquisitions) et la géométrie d'acquisition.

TABLEAU I Probabilité d'avoir une base interférométrique inférieure à un seuil donné (d'après Solaas, 1994)

Valeur du seuil B_0(m)	20	70	600	1100
Pourcentage de couples ayant une base inférieure au seuil B_0	2	6	50	78

B. Base spatiale

La base spatiale n'a théoriquement pas d'effet en interférométrie différentielle, comme le montre l'équation (3). Cependant, ce facteur agit indirectement en introduisant un effet stéréoscopique dans l'interférogramme, qui se manifeste par une dégradation de la cohérence de phase. Ainsi, dans le cas où la base stéréoscopique est nulle (c'est-à-dire que la trajectoire est rigoureusement identique d'un passage au suivant), l'interférogramme est insensible au relief et donne directement le déplacement, ou plus exactement la projection de ce dernier sur l'axe de visée. Au contraire, une grande base stéréoscopique augmente la contribution du relief, qui devient donc plus difficile à éliminer. La précision du déplacement mesuré s'en trouve alors dégradée, et ce phénomène est aggravé lorsque la pente est orientée face au radar où lorsque des zones boisées produisent des rétrodiffusions volumiques. La mesure de déplacements par interférométrie différentielle est donc favorisée par une base aussi étroite que possible, qui permet d'obtenir des franges beaucoup plus resserrées sur le site en mouvement que sur le reste de la scène, facilitant la séparation des deux systèmes de franges.

Il n'est pas suffisant d'avoir identifié l'influence de la base sur le contenu informatif du signal. En effet, il faut également pouvoir prédire la base, ce que les techniques classiques de contrôle d'orbite ne permettent de faire qu'à court terme. L'idéal est de pouvoir piloter le satellite de manière à maintenir une base déterministe, comme ce fut le cas lors de la mission tandem ERS-1 / ERS-2. C'est une difficulté majeure de l'interférométrie radar à une seule antenne (que ce soit pour calculer des altitudes ou des déplacements) : **les performances de l'interférométrie différentielle sont difficilement prédictibles avant l'acquisition des données**, sauf au prix d'un pilotage très précis.

Solaas (1994) a étudié les bases stéréoscopiques obtenues pendant la phase multidisciplinaire d'ERS-1. Sur le tableau I, on indique la probabilité d'avoir un couple dont la base est inférieure à un seuil donné. Ce type d'analyse statistique permet, après quelques années d'exploitation, d'étudier la probabilité d'obtenir une base stéréoscopique appropriée et donc de relativiser des succès scientifiques obtenus grâce à des bases miraculeusement courtes. En effet, dans les premières années de la mission ERS-1, la plupart des démonstrations de faisabilité qui ont fait la popularité de l'interférométrie ont utilisé des couples d'images soigneusement sélectionnés dans les archives de l'Agence Spatiale Européenne, ce qui est loin de correspondre aux conditions dans lesquelles s'effectue la gestion des risques majeurs.

C. Base temporelle

La base temporelle (intervalle de temps entre les deux acquisitions) a une double influence en interférométrie différentielle:

- cohérence;
- adéquation aux caractéristiques dynamiques du phénomène. Sur le tableau II, on résume de manière qualitative l'effet de la base temporelle sur la sensibilité de l'interférogramme différentiel au mouvement. Quelle que soit la vitesse de déformation du terrain, les longues bases temporelles sont généralement pénalisées par une baisse sensible de la cohérence. C'est le cas de RADARSAT (multiples de 24 jours) et prochainement d'ENVISAT (multiples de 35 jours comme ses prédécesseurs ERS-1 et ERS-2).

D. Géométrie d'acquisition

La géométrie d'acquisition peut être décrite par deux paramètres indépendants:

- l'angle d'incidence (par rapport au nadir);
- la direction azimutale d'éclairement (déterminée par l'orbite).

Ces paramètres déterminent en fait la direction de visée, dont l'influence est double en interférométrie différentielle:

- la géométrie de l'image radar dépend de la direction de visée et du relief – les effets de *layover* et d'ombre sont à éviter;
- les mouvements du terrain étant projetés sur la direction de visée, celle-ci a donc une influence sur la sensibilité de l'interférogramme différentiel; la reconstitution d'un déplacement absolu nécessite une con-

naissance experte du phénomène (par exemple la direction de la déformation) ou bien davantage d'information, notamment plusieurs interférogrammes (par exemple un couple ascendant et un couple descendant).

Les contraintes liées à la géométrie d'acquisition sont particulièrement sévères dans le cas de fortes pentes. Or, les phénomènes de glissement de terrain et d'éruption volcanique se situent à peu près toujours dans ce cas. Le choix de la géométrie d'acquisition (ascendant ou descendant? quel faisceau? etc.) est donc une question à prendre au sérieux pour l'étude de tels phénomènes.

Des simulations peuvent être mises en oeuvre pour tenter de répondre à ce genre de question. Il s'agit de simulations simplifiées de l'image d'amplitudes et de l'interférogramme à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) grossier et d'une connaissance grossière des caractéristiques dynamiques du phénomène géologique : inutile à ce stade d'utiliser les outils sophistiqués dont il est question à la fin de cette première partie.

E. Longueur d'onde

La fréquence du radar joue un rôle majeur dans la prévision des performances de l'interférométrie différentielle. En effet, si elle est contrainte par des exigences instrumentales (liées à la géométrie de prise de vue, à la taille de l'antenne, à la résolution, etc.), la longueur d'onde a aussi un impact sur la précision du déplacement mesuré, puisque pour un rapport signal sur bruit donné la précision est directement proportionnelle à la longueur d'onde : elle est donc théoriquement meilleure pour de courtes longueurs d'onde. Par contre, les grandes longueurs d'onde sont moins sujettes aux pertes de cohérence (dues notamment à la végétation).

La longueur d'onde permet de traduire les contraintes de base temporelle en termes spatiaux : une grande longueur d'onde a le même effet qu'une courte base temporelle et inversement, comme on le résume sur le tableau II. Cette influence a pu être confirmée à partir d'interférogrammes ERS et JERS sur les mêmes sites.

Des dérives infimes de la fréquence porteuse peuvent entraîner des variations parasites de la longueur d'onde détectables dans l'interférogramme (Massonnet, 1995). Cependant, les caractéristiques de ces phénomènes (très basse fréquence spatiale, effet exclusivement azimutal) permettent d'en négliger l'effet sur les mesures de déformations.

TABLEAU II Influence de la longueur d'onde sur la sensibilité de l'interférogramme différentiel

	Grande longueur d'onde	Courte longueur d'onde
Mouvement lent :	l'interférogramme différentiel est insensible au mouvement	l'interférogramme différentiel est insensible au mouvement et il est fortement décorrélé
Mouvement rapide :	l'interférogramme différentiel est sensible au mouvement	l'interférogramme différentiel est sensible au mouvement mais il est fortement décorrélé

F. Résolution spatiale

La précision des mesures de déformation peut être améliorée aux dépens de la résolution spatiale par un filtrage multivue. La résolution spatiale est donc une limite majeure à l'observation de phénomènes de faible extension. Dans le cas de mouvements de grande ampleur dont les variations spatiales sont très faibles, ce traitement est peu pénalisant et il donne la possibilité d'accéder à des mesures très précises.

G. Transmission et stockage

Plusieurs scenarios peuvent être envisagés entre l'acquisition et la livraison de la donnée interférométrique. Chaque scenario comporte des contraintes particulières :

- si la zone d'étude est dans le cercle de visibilité d'une station de réception, le signal brut peut être transmis en temps réel et traité sur place; si l'opérateur est proche de la zone, l'approvisionnement peut être rapide, sinon l'expérience montre que l'approvisionnement peut être long et

compliqué (ce qui est difficilement compatible avec les exigences opérationnelles du suivi des risques);
- si la zone d'étude n'est pas dans le cercle de visibilité d'une station de réception, seule une capacité de stockage suffisante peut rendre l'application viable.

Ces contraintes sont générales pour toutes les applications. Dans le cas particulier des applications qui nous intéressent ici, deux contraintes spécifiques sont à mentionner:

- le processus de compression (bord) et décompression (sol) qui sont étudiés pour les prochains systèmes doivent préserver la phase du signal;
- la livraison doit pouvoir se faire dans des délais compatibles avec le degré d'urgence de la surveillance.

1.2.2. Facteurs environnementaux

Le comportement du paysage entre les acquisitions joue un grand rôle dans la qualité de l'interférogramme et dans son aptitude à fournir aussi bien un MNT qu'une carte de déformations. D'une manière générale, la mesure du déplacement est favorisée par une grande stabilité interne de la surface.

Par paysage on entend à la fois l'atmosphère (troposphère et ionosphère), la végétation (croissance et agitation) et le sol (dont les propriétés géométriques et électromagnétiques varient sous l'effet des actions de l'homme et des variations naturelles de température et d'humidité). Ces effets, cohérents ou non, se superposent dans l'interférogramme. Leur ordre de grandeur est mal connu mais sans doute important. Les effets de phase et notamment l'effet des instabilités sur la cohérence de phase ont été analysés sur le plan théorique, notamment par Zebker et Villesenor (1992) et Massonnet *et al.* (1993b). On rappelle ici les principaux de ces effets. Enfin, le cas des zones urbaines appelle quelques commentaires en fin de section.

A. Effets de l'atmosphère et de l'ionosphère

La sensibilité d'un interférogramme aux conditions atmosphériques empêche de garantir la précision des mesures géophysiques en dehors de toute considération météorologique. Les variations spatiales de l'indice de réfraction atmosphérique étant importantes à l'échelle d'une scène mais négligeables à l'échelle de la cellule de résolution, les effets de l'atmos-

phère sont généralement assez fortement corrélés. Ces effets ont été étudiés par Massonnet et Feigl (1995), par Tarayre (1996). Ces auteurs montrent que, dans des conditions météorologiques particulières, les artefacts qui en résultent peuvent être de plusieurs franges. Dans le meilleur des cas, ils peuvent être localisés et identifiés, et des pistes ont été proposées pour contourner en partie le problème (Dupont *et al.*, 1997). Par contre, des phénomènes atmosphériques complexes peuvent affecter toutes les fréquences spatiales de l'interférogramme, ce qui permet difficilement de les caractériser. Ces effets sont toutefois moins pénalisants pour l'interférométrie différentielle que pour l'interférométrie topographique.

Quant aux variations de l'indice de réfraction ionosphérique, elles sont caractérisées par de très basses fréquences spatiales. Si elles conduisent à des artefacts importants en termes absolus, elles sont donc peu à même de bruiter un interférogramme différentiel à l'échelle d'un phénomène géologique de taille moyenne. Ce point reste toutefois à expertiser dans le cas de déformations qui présenteraient elles aussi de très basses fréquences spatiales.

Notons que ces effets ont été étudiés dans le cadre de recherches en géodésie spatiale, et qu'on est en présence des mêmes longueurs d'onde et donc d'artefacts comparables.

B. Effets de la végétation et du sol

La végétation est un milieu très instable, qui produit des effets cohérents (croissance des cultures) et des effets non cohérents (agitation de la canopée, dispersion volumique). Chacun de ces deux types d'effets dépendant d'un grand nombre de facteurs biologiques et environnementaux, il est extrêmement difficile de les caractériser et donc d'identifier la contribution de la végétation à des phénomènes de déphasage.

Le sol peut également présenter des instabilités, qui conduisent à:

- des effets cohérents sous l'effet de phénomènes indépendants du phénomène géologique étudié (gel et dégel en région montagneuse ou dans les pays froids, variations d'humidité liées à l'arrosage ou aux conditions météorologiques);
- des effets incohérents liés aux travaux agricoles, aux éboulements ou à l'érosion; signalons que les phénomènes d'éboulement et d'érosion sont souvent liés avec les phénomènes géologiques, même avant les scénarios catastrophiques.

Vachon *et al.* (1996) ont obtenu, avec des données ERS, des mesures très précises de déplacement d'un glacier, mais seuls 5 couples sur 12 étaient exploitables en termes de cohérence, les facteurs de cohérence étant essentiellement la température et les précipitations. Ces résultats ont été obtenus sur une région glaciaire dépourvue de végétation, dans des conditions favorables de température et d'humidité, permettant une cohérence élevée. La cartographie du séisme de Landers (Massonnet *et al.*, 1993a) a bénéficié de conditions environnementales tout aussi favorables (zone désertique). Retenons de ces expériences que **les résultats spectaculaires obtenus dans certaines conditions particulièrement favorables ne doivent pas occulter la probabilité réduite de ces conditions favorables**.

Enfin, dans le cas des volcans et des glissements de terrain, insistons sur l'importance des éboulements dans les parties concaves et très pentues. En effet, les éboulements sont des phénomènes gravitaires qui stabilisent les pentes en déplaçant de la matière des pentes fortes vers les pentes faibles, et qui font chuter la cohérence par la même occasion.

C. Effets des mouvements de très grande ampleur

Les effets de très grande ampleur sont assez mal connus car ils affectent des zones beaucoup plus grandes qu'une scène. Ces effets peuvent être causés par les marées océaniques (Massonnet, 1995). Lorsque le mouvement affecte toute la scène, l'estimation de la base stéréoscopique peut être très délicate. En effet, la position des points d'appui ne peut pas, dans ce cas, être reliée à leur déphasage dans l'interférogramme.

Les enjeux scientifiques liés à l'étude de ces effets rejoignent par certains aspects ceux que l'on étudie par altimétrie radar, que ce soit par la nature et par l'ampleur des phénomènes étudiés ou par la nature de contraintes environnementales.

D. Cas des zones urbaines

Le suivi des risques géologiques en zone urbaine constitue un cas intéressant qui mérite quelques commentaires. En effet, les villes sont des lieux "propres" d'un point de vue phasimétrique, dans le sens où elles présentent des surfaces extrêmement stables à l'échelle des longueurs d'onde utilisées, contrairement aux surfaces agricoles ou boisées. Dans une image de cohérence, seuls les affleurements rocheux sont aussi cohérents que les zones urbaines. Cette cohérence, propice aux applications interférométriques, est malheureusement contrebalancée par des artefacts typiques de

l'imagerie radar en zone urbaine : réflexions multiples, ombres, *layover*, réflexion sur des formes en coin de cube conduisant à des intensités saturées. Ces artefacts, clairement visibles sur les images d'amplitude, rendent leur interprétation très malaisée et leur simulation est extrêmement délicate si l'on cherche à mettre en évidence des effets sur la phase.

Grâce à cet avantage (la cohérence élevée) et malgré cet inconvénient (les artefacts), l'interférométrie différentielle reste un outil prometteur pour la surveillance géologique des zones urbaines, ne serait-ce que parce que la vulnérabilité y est plus élevée que partout ailleurs face à la menace d'une catastrophe géologique. Ses performances restent malgré tout à évaluer.

1.2.3. Facteurs opérationnels

A. Fluidité de la chaîne de mission

La chaîne de mission d'un satellite d'observation comporte un certain nombre de phases (spécification de besoin, planification, acquisition, réception, livraison) qui font intervenir des acteurs très différents, le plus souvent délocalisés, et un dysfonctionnement, même léger, de l'une de ces phases, suffit à compromettre l'ensemble de l'opération. L'expérience montre que ces dysfonctionnements sont loin d'être rares, surtout dans le cas des systèmes radar qui sont encore plus ou moins expérimentaux. La fluidité de la chaîne de mission est donc un facteur de performance primordial lorsqu'on se place dans un contexte opérationnel.

B. Estimation de la base stéréoscopique

Les éphémérides d'ERS-1 ont une précision suffisante pour la plupart des applications de ce système, mais elles sont un peu justes pour le géocodage et clairement insuffisantes pour l'interférométrie, en raison de l'effet de la base stéréoscopique sur la sensibilité du déphasage au relief. L'injection de connaissances externes s'impose donc, sous la forme de points d'appui qui permettent d'affiner la connaissance de la base stéréoscopique (Werner *et al.*, 1992). Ce traitement est soumis à plusieurs contraintes:

- l'existence même de ces points d'appui et leur nombre;
- leur précision géographique (planimétrique et altimétrique);
- leur précision de localisation dans l'image (liée à la qualité radiométrique de l'image et à la richesse planimétrique du paysage);
- leur répartition spatiale dans l'image;

- la qualification d'opérateurs capables de saisir des points dans une image radar (cette contrainte est évoquée ci-après).

Si un MNT, même grossier, est disponible, il permet de caler l'interférogramme de la même manière.

Le besoin d'une grande précision sur la base stéréoscopique est cependant beaucoup moins important en interférométrie différentielle qu'en interférométrie topographique, c'est même un problème secondaire lorsque la base est très étroite.

C. Qualification des opérateurs

On ne s'improvise pas utilisateur d'images radar. En interférométrie, comme dans d'autres méthodes d'exploitation, un certain nombre d'étapes requiert une formation adaptée:

- l'évaluation préliminaire de la qualité des données (notamment pour décider si la cohérence est suffisamment élevée);
- le déroulement des franges;
- la saisie de points d'appui;
- l'analyse visuelle des images (amplitude, cohérence, déphasage).

Aujourd'hui les interventions manuelles, qui sont effectuées dans un cadre expérimental, impliquent en général des experts en géophysique ou en imagerie radar, ce qui n'est pas concevable dans le contexte d'une exploitation opérationnelle. Par ailleurs, les risques géologiques représentent un enjeu économique et social important, ce qui exclut de s'appuyer sur des procédures automatiques incomplètes et incertaines, d'où le besoin d'opérateurs qualifiés pour superviser ces procédures. Ce problème est général en télédétection, discipline dans laquelle on forme beaucoup plus de chercheurs que d'opérateurs ou de techniciens (Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, 1998).

D. Élimination des franges topographiques

Une information sur la topographie est nécessaire pour séparer les effets stéréoscopiques liés au relief et ceux liés au mouvement (équation 2). Cette information peut être issue d'un deuxième interférogramme ou, lorsqu'il est disponible, d'un MNT. Or, des MNT de qualité sont loin d'être disponibles partout dans le monde; par ailleurs on peut se demander, entre le segment sol et l'utilisateur, qui doit fournir le MNT et même qui doit le spécifier, puisque la précision requise dépend notamment de la base spatiale, *a priori* non connue avant l'acquisition.

En effet, l'aptitude d'un MNT à résoudre ce problème n'a rien d'intrinsèque. Elle dépend notamment:

- de la géométrie du radar (les erreurs du MNT perpendiculaires à la trace ont le plus d'effet);
- de la base stéréoscopique (plus celle-ci est large plus le MNT doit être précis);
- du phénomène étudié (vitesse et direction des déplacements).

E. Projection du déplacement sur l'axe de visée

La géométrie d'acquisition (essentiellement la direction d'éclairement et l'angle de visée) a un impact considérable sur la sensibilité des données interférométriques. Or, même si l'on obtient des acquisitions avec une géométrie de prise de vue idéale, on n'échappe pas à une contrainte géométrique majeure, illustrée par la figure 1 : le déphasage des échos radar n'est sensible qu'à la projection du déplacement sur l'axe de visée. Tout mouvement dans un plan perpendiculaire à l'axe de visée, qui n'affecte pas la distance mesurée, est donc indétectable par interférométrie.

Il en découle la nécessité d'une connaissance générique du phénomène dynamique étudié, en d'autres termes un modèle de comportement, dont l'interférogramme doit permettre de déterminer les paramètres. En effet, l'obtention des trois composantes du vecteur déplacement à partir de la seule projection sur la direction de visée exige une information supplémentaire sur les caractéristiques du mouvement, notamment sa direction (par exemple vertical, ou horizontal, ou encore perpendiculaire à la pente du terrain).

La prise en compte de cette connaissance externe du comportement peut se faire de manière implicite et interactive, mais son automatisation peut être envisagée en paramétrant le phénomène et en minimisant, par un processus d'optimisation, la distance entre la déformation observée et la déformation calculée. C'est la méthode utilisée par Massonnet *et al.* (1994a) pour cartographier les déformations de l'Etna liées à son activité éruptive.

1.2.4. Facteurs scientifiques

À tous les facteurs de succès de nature technologique, environnementale ou opérationnelle, s'ajoutent des facteurs de nature scientifique.

La possibilité de caractériser un phénomène géophysique par interférométrie différentielle dépend notamment de la connaissance générique que

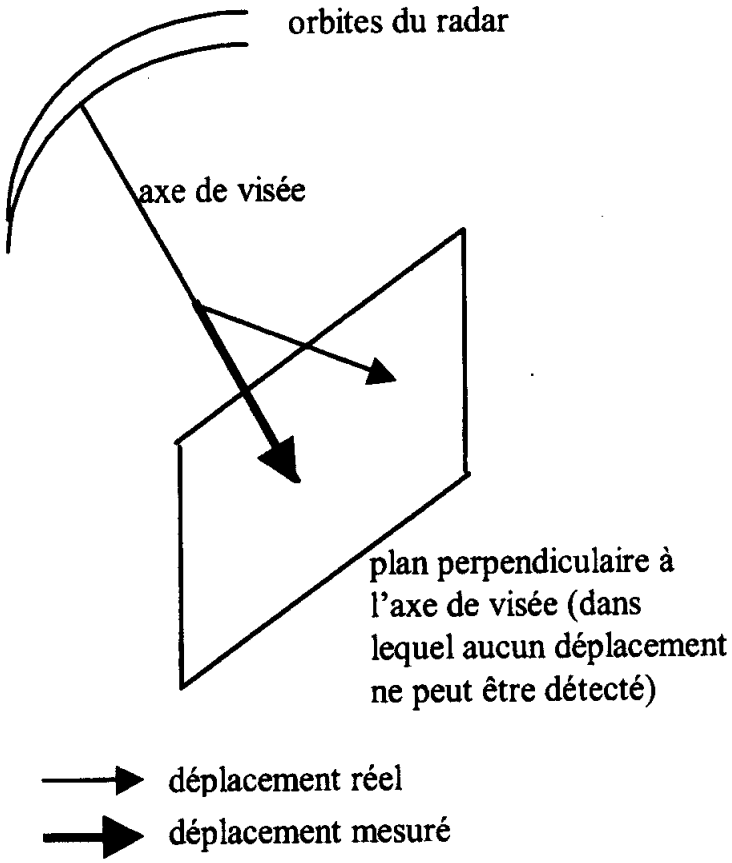


FIGURE 1 Projection du déplacement sur l'axe de visée

l'on a de ce phénomène ainsi que des phénomènes parasites et de leur effet (cohérent ou non) sur la phase. La maîtrise incomplète des comportements géophysiques fait donc de l'inversion de modèles de déformation un exercice particulièrement dangereux, car les paramètres obtenus par optimisation peuvent intégrer, à tort, les influences de déphasages mal modélisés, produits par exemple par la réfraction atmosphérique, les erreurs du MNT ou la méconnaissance des paramètres instrumentaux ou orbitaux. De plus, plusieurs manifestations d'un même phénomène géophysique peuvent apparaître simultanément dans un interférogramme : par exemple l'humidité de l'air (qui modifie l'indice de réfraction de l'atmosphère) peut être associée à un sol détrempé (qui modifie les propriétés électromagnétiques du sol) et éventuellement gonflé (qui réduit le chemin optique); la mesure de l'un de ces aspects risque évidemment d'intégrer l'influence des autres.

On peut préciser cette contrainte scientifique en termes d'expertise sur l'évolution du processus géophysique. En effet, on attend surtout de l'inter-

férométrie différentielle qu'elle permette de détecter des signes avant-coureurs (gonflement pré-éruptif ou début de décrochement). Or, le signe avant-coureur n'a d'intérêt que si la connaissance des processus dynamiques permet de prévoir de déroulement de l'éruption ou du glissement. C'est donc à cette condition que l'interférométrie différentielle peut être considérée comme un outil de prévention des risques géologiques.

La compétence des géologues et des volcanologues doit leur permettre de ne pas surestimer le risque potentiel, car peu de phénomènes potentiellement dangereux auront des suites catastrophiques. Tazieff et Sabroux (1990) rappellent qu'une évacuation inutile constitue également un risque, celui d'une catastrophe socio-économique, et il convient de s'en protéger autant que des risques géologiques proprement dits. Pour approfondir ces connaissances, il est intéressant d'avoir observé et analysé des phénomènes antérieurs. L'interférométrie différentielle peut là aussi jouer un grand rôle.

Ces contraintes liées aux connaissances scientifiques posent la question du rôle intermédiaire que doivent jouer les scientifiques entre les fournisseurs de données spatiales et les utilisateurs opérationnels, généralement non scientifiques (assureurs, sécurité civile, services de l'état ou collectivités territoriales).

1.2.5. Simulation d'images pour l'analyse des facteurs de performance

Les travaux menés par Aérospatiale Satellites (aujourd'hui Alcatel Space Industries) et par l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) ont montré que la simulation du signal radar pouvait être utilisée pour améliorer la connaissance des contraintes, que ce soit pour la cartographie du relief (Polidori, 1995, 1997) ou pour la cartographie des déformations (Polidori *et al.*, 1995). Précisons qu'il ne s'agit pas de simuler des interférogrammes (ce que l'on fait, par exemple, pour éliminer les franges topographiques) mais de simuler des produits aussi bruts que possible, typiquement le signal brut ou, à la rigueur, l'image SLC (complexe monovue). Ces produits font alors l'objet d'un traitement interférométrique dans des conditions opérationnelles. Les artefacts qui sont introduits, en entrée, dans les modèles d'orbite, d'instrument ou de paysage, sont alors pris en compte automatiquement et il s'agit de surveiller leurs effets, maillon après maillon, jusqu'au bout de la chaîne interférométrique, c'est-à-dire la carte de déformations.

1.3. État de l'art

À notre connaissance, la première référence proposant une utilisation de l'interférométrie radar en mode différentiel pour la détection de mouvements est Massonnet (1985). Mais il faut attendre la fin des années 1980 pour que la littérature internationale fasse état des travaux menés au Jet Propulsion Laboratory (JPL) à partir des données SEASAT. Toutefois, les résultats publiés par Gabriel *et al.* (1989) présentent peu d'intérêt thématique et leur interprétation est discutable.

En parallèle avec les travaux du même JPL sur les bases théoriques de l'interférométrie (Zebker and Goldstein, 1986; Gabriel and Goldstein, 1988; Madsen *et al.*, 1993), des formulations théoriques variées de l'interférométrie sont proposées par divers laboratoires européens en particulier au Centre national d'études spatiales (CNES) (Massonnet, 1985), au Politecnico di Milano (POLIMI) (Prati and Rocca, 1990; Prati *et al.*, 1990), ainsi qu'aux Universités de Stuttgart et de Zürich. À la même époque, l'Université de Naples s'associe au JPL pour étudier les potentialités d'un radar spatial à 2 antennes, mais dans un contexte très technologique et sans prendre en compte les applications autres que la topographie.

Après le lancement d'ERS-1, l'interférométrie reste entre les mains des spécialistes du radar à synthèse d'ouverture et la communauté géophysique ne s'y intéresse pas encore sérieusement. La première perspective reste l'extraction de MNT, mais les produits dérivés de l'interférogramme (image de cohérence, image de pente, interférogramme différentiel) ont rapidement été envisagés (Werner *et al.*, 1993; Prati *et al.*, 1992). L'expérience de Bonn, menée par des laboratoires européens sous l'égide de l'Agence Spatiale Européenne (Coulson and Solaas 1993), a confirmé la théorie, mais elle a été réalisée dans des conditions tellement idéales que les résultats obtenus ne reflètent en aucun cas les véritables performances de l'interférométrie différentielle.

À partir de 1993, les travaux sur l'interférométrie différentielle sont de plus en plus associés à des recherches en géophysique (Massonnet *et al.*, 1993a, 1994ab; Massonnet, 1995; Achache *et al.*, 1995). Cependant:

- ils restent peu représentatifs des conditions opérationnelles dans lesquelles pourraient travailler les futurs utilisateurs, et utilisent en particulier de très grandes quantités d'images, dans lesquelles le couple le meilleur est cherché; c'est ainsi que des chercheurs obtiennent sur le site de la Clapière (glissement de terrain près de Saint-Étienne-de-Tinée) une base stéréoscopique de quelques mètres, permettant de

se dispenser de corriger les effets topographiques malgré le caractère montagneux de la zone; de même, Goldstein *et al.* (1993) ont pu mesurer le déplacement d'un glacier de l'Antarctique à partir d'un interférogramme ERS-1 grâce à une base de 4 m;

- ils restent focalisés sur l'interférométrie comme moyen exclusif d'extraire l'information, et les images d'amplitude, qui pourraient alimenter une interprétation géologique complémentaire, ne sont quasiment pas utilisées.

En France, des organismes comme le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, le Commissariat de l'Energie Atomique, l'Institut de Physique du Globe ou l'Institut Géographique National s'impliquent de manière plus ouverte, mais les performances de cette technique sont difficiles à évaluer et ses perspectives opérationnelles restent donc très incertaines.

À partir de 1995, c'est-à-dire après la mission SIR-C et la mission tandem ERS-1/ERS-2, les recherches en interférométrie radar sont enrichies par de nouvelles données (Mouginis-Mark, 1995; Vachon *et al.*, 1996) tandis que la communauté s'interroge sur l'aptitude de RADARSAT à relever le défi de l'interférométrie : il apparaît rapidement que le contrôle d'orbite est loin d'être optimal, et que le cycle de 24 jours risque d'être pénalisant en termes de cohérence de scène (Vachon *et al.*, 1995).

Actuellement, la partie amont de la chaîne interférométrique (de l'écho radar à l'interférogramme différentiel) a été mise en équation de manière rigoureuse et démontrée de manière indiscutable, mais l'exploitation repose sur une modélisation délicate et les démonstrations de faisabilité, dues à des experts plus qu'à des utilisateurs opérationnels, ont souvent bénéficié de circonstances favorables peu reproductibles.

Des petites entreprises (bureaux d'études, sociétés de service, distributeurs) se sont naturellement intéressées aux apports potentiels de l'interférométrie différentielle, mais la complexité des traitements et les difficultés à investir dans un domaine nouveau ont limité cet enthousiasme. La communauté scientifique s'est aussi largement mobilisée, mais les plus gros efforts se sont portés sur le déroulement de franges avec des héritages culturels davantage liés à la robotique et au traitement du signal qu'aux sciences de la Terre, tandis que des problèmes de modélisation subsistaient. Les grandes entreprises industrielles, capables d'investir dans des recherches approfondies et possédant à peu près les compétences requises pour spéci-

fier les développements, se sont également impliquées de manière irrégulière, faute de perspectives claires sur le marché de l'interférométrie radar.

2. PERTINENCE DE L'INTERFÉROMÉTRIE DIFFÉRENTIELLE POUR LE SUIVI DES RISQUES GÉOLOGIQUES

2.1. Rappel sur les besoins en matière de risques géologiques

2.1.1. Quels risques géologiques ?

On s'est intéressé à trois types de risques géologiques :

- les éruptions volcaniques,
- les séismes,
- les glissements de terrain.

Tous les trois ont en commun de menacer des vies humaines un peu partout dans le monde, et de se manifester par des déformations, lentes ou brutales, de la surface terrestre, sur des étendues relativement grandes et avec des amplitudes comparables à la longueur d'onde des principaux systèmes radar. Il est donc pertinent de se demander si de telles déformations peuvent être mesurées par interférométrie différentielle.

A. Éruptions volcaniques

Il est difficile de faire un commentaire générique sur la prévision des risques volcaniques, tant les quelques 600 volcans actifs du globe diffèrent par leurs caractéristiques et leurs comportements. Ils diffèrent aussi par leurs impacts. Ainsi, les conséquences meurtrières les plus classiques sont les raz de marée, les coulées de boue, les chutes de projectiles et surtout les effets indirects comme les maladies et les famines.

Une éruption volcanique est annoncée par différents signes précurseurs, qui exigent des moyens de surveillance différents :

- variations de la température;
- variations de la composition et du débit des gaz fumerolliens;
- variations du champ électromagnétique;
- variations du champ de gravité;
- secousses telluriques;
- déformations du sol.

C'est pour la détection de ce dernier signe précurseur que l'interférométrie différentielle peut s'avérer un outil intéressant, au même titre que les techniques de positionnement par GPS ou de télémétrie laser. Ce phénomène géométrique est lié aux variations de pression gazeuse qui se produisent à l'intérieur de la chambre magmatique du volcan sous l'effet des variations de température.

B. Séismes

Les résultats spectaculaires obtenus par Massonnet *et al.* (1993a, 1994b) et le grand bénéfice qu'en tireront les scientifiques pendant des années ne doivent pas occulter l'impuissance qui caractérise les mêmes scientifiques et les décideurs quand il s'agit de prévoir et surtout de dater un futur séisme. Là encore, l'interférométrie différentielle pourrait jouer un rôle important, car les phénomènes d'accumulation de contrainte et de propagation de fracture se déroulent sur de très grandes étendues et nécessitent une observation dense dans l'espace et dans le temps avec une grande précision géométrique.

Cependant, face à l'absence de méthode fiable pour prévoir la catastrophe, c'est sur l'autre composante du risque, à savoir la vulnérabilité, que porte en général la prévention. Contre les risques de tremblement de terre, les meilleurs moyens de prévention restent donc la construction parasismique et l'éducation des populations, comme le montre quotidiennement la société japonaise.

L'interférométrie radar différentielle a donc un avenir incertain comme outil de prévision des séismes, quoiqu'elle présente quelques vertus intéressantes par rapport aux autres techniques, notamment en termes de continuité spatiale, pour la compréhension de phénomènes dynamiques de grande envergure.

C. Glissements de terrain

Les glissements de terrain sont généralement caractérisés par de fortes pentes et par des tailles modestes, ce qui rend difficile leur observation par télédétection radar spatiale (essentiellement à cause d'une résolution modérée et d'un angle d'incidence très petit). Le déplacement, d'origine gravitaire, peut atteindre des vitesses de l'ordre du centimètre par jour, parfois plus. L'interférométrie radar est donc potentiellement adaptée, à condition que les délais entre acquisitions soient suffisamment courts pour maintenir une certaine cohérence.

Le glissement de la Clapière, situé à Saint-Étienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes), suscite beaucoup d'intérêt chez les spécialistes de l'interférométrie radar, et a même été choisi comme site expérimental pour les travaux du groupe FRINGE (réseau de chercheurs animé par l'Agence Spatiale Européenne dans le but de promouvoir les applications de l'interférométrie radar). En effet :

- il est de grande taille;
- sa vitesse est importante (environ 2 cm/jour);
- c'est l'un des glissements les mieux instrumentés au monde;
- menaçant une commune de 1500 habitants, il fait l'objet d'une surveillance importante (sous maîtrise d'ouvrage du Centre d'études techniques de l'équipement de Nice) et de travaux d'aménagement coûteux : un succès scientifique aurait donc d'autant plus de retentissement; malheureusement, le fait de n'avoir pas associé le maître d'ouvrage et d'avoir mal utilisé la presse a conduit à l'effet inverse de celui qui était escompté (cet écueil classique sera évoqué plus loin).

Malgré la diversité des types de glissements, ils ont des caractéristiques génériques, à la fois en termes de danger et en termes de vulnérabilité.

Du point de vue du danger, c'est-à-dire du comportement et de la probabilité de l'événement, on note que l'évolution est corrélée avec la saison (pluie, gel, etc.) dans les régions tempérées. Cette propriété pourrait être affinée pour mieux cerner les limites de l'interférométrie en termes de cohérences, et pour formuler des recommandations quant aux dates d'acquisition.

Du point de vue de la vulnérabilité, un glissement de terrain menace :

- (quelquefois) des habitations et des infrastructures urbaines / industrielles;
- (souvent) des voies de communication (routes, canaux, voies ferrées, lignes électriques et téléphoniques) dont l'interruption aurait un coût important;
- (à peu près toujours) un cours d'eau dont le barrage accidentel pourrait entraîner des inondations meurtrières en aval

2.1.2. Notions de risque et de suivi des risques

Avant de confronter les performances de l'interférométrie différentielle aux besoins du suivi des risques géologiques, il convient de préciser en premier lieu les notions de risque et de suivi.

Le risque est la combinaison d'un événement plus ou moins probable et d'une certaine vulnérabilité (présence d'habitations, de ressources ou d'infrastructures auxquelles la collectivité accorde un prix important). Le suivi d'un risque répond donc à une double préoccupation, l'observation par satellite pouvant intervenir dans les deux cas:

- la prévision d'un événement (qui peut consister à évaluer des facteurs de risques, à détecter un signe précurseur, à observer son déclenchement ou à prédire son évolution future);
- l'évaluation et la cartographie d'un degré de vulnérabilité.

Si l'on se place dans l'optique d'un décideur, cette double préoccupation doit également être permanente. En effet, une décision (aménagement, inderdiction d'aménager, campagne de sensibilisation, etc.) doit pouvoir agir sur le risque en minimisant soit le **danger** soit la **vulnérabilité**. C'est ainsi que les constructions parasismiques réduisent la vulnérabilité des zones urbanisées, tandis que des digues peuvent repousser les dangers d'inondation loin des zones vulnérables.

Rappelons enfin que le risque n'est pas une notion intrinsèque. En effet, on conçoit aisément que les concepts de vulnérabilité et de danger sont variables dans l'espace et dans le temps. Le risque l'est donc aussi et il doit être appréhendé par une approche spatialisée et dynamique. Ainsi, pour prendre un exemple caricatural, une forêt qui a brûlé ne craint plus les incendies, car l'agression a fait disparaître la vulnérabilité. De même, les inondations catastrophiques sont souvent le résultat d'événements météorologiques exceptionnels mais aussi d'aménagements intempestifs qui, en favorisant le ruissellement, ont ainsi accru leur propre vulnérabilité. Un outil de surveillance opérationnel doit donc obligatoirement prendre en compte cette double dimension spatiale et temporelle. On retrouvera cette exigence dans la comparaison entre l'interférométrie radar différentielle et les autres techniques de mesure de déformations.

Le suivi des risques implique donc non seulement la détection d'un phénomène et sa caractérisation, mais aussi sa surveillance et l'étude de son évolution au cours du temps, ainsi que toutes les actions qui permettent d'en minimiser les effets négatifs. On aurait pu parler de gestion des risques géologiques, mais la notion de gestion a une dimension administrative, financière et, pour tout dire, politique, qui déborde du cadre de notre étude. Le suivi des risques géologiques comporte donc un certain nombre

de phases dont l'enchaînement aura pour effet d'atténuer soit le danger, soit la vulnérabilité:

1) **prévoir l'événement**:

- détection de signes avant-coureurs,
- évaluation et cartographie des facteurs de risque,
- surveillance continue;

2) **minimiser les conséquences**:

- aménagement de protection,
- éducation de la population,
- entrainement des équipes d'intervention,
- planification des opérations d'évacuation et de secours,
- évacuation;

3) **comprendre le phénomène**:

- comparaison à des catastrophes antérieures,
- modélisation,
- simulation des conséquences;

4) **évaluer la vulnérabilité**:

- cartographie de l'occupation du sol,
- expertise.

à ces 4 phases, qui constituent le suivi du risque proprement dit et qui doivent être menées à bien quelle que soit l'issue (catastrophique ou non) de l'événement, il faut ajouter une cinquième phase, de loin la plus coûteuse de toutes, mais dont le coût sera amoindri si les phases de suivi ont été menées correctement:

5) **réparer les conséquences de la catastrophe**:

- indemniser,
- reconstruire.

Nous proposerons plus loin (section 2.5) quelques commentaires sur ce que l'enchaînement de ces phases implique en termes de responsabilité politique.

C'est clairement dans les phases 1 et 3 que l'on peut faire intervenir l'interférométrie différentielle, ainsi que, dans une moindre mesure, dans les phases 4 et 5.

Dans la phase 1, en complément d'autres données (l'image d'amplitude peut révéler des fractures anormales), l'interférogramme différentiel est

une source d'information dont les niveaux de fiabilité sont variables : depuis la simple détection d'une déformation (à l'issue de laquelle on pourra éventuellement passer le relais à une technique mieux maîtrisée) jusqu'à la mesure proprement dite, qui pourra même faire l'objet d'une cartographie tridimensionnelle.

Dans la phase 3, l'interférogramme peut alimenter des modèles de déformation, au même titre que des mesures par GPS ou par télémétrie laser; l'interférométrie radar offre cependant l'avantage de fournir une image spatialement continue et donc propice à une expertise visuelle sophistiquée. Achache *et al.* (1995) ont utilisé un interférogramme issu d'images ERS-1 pour mesurer le déplacement du glissement de terrain de la Clapière (Saint-Étienne-de-Tinée) avec une précision centimétrique, en inversant un modèle paramétrique de déformation.

Dans la phase 4, l'image radar peut jouer un rôle mineur dans la cartographie de l'occupation du sol (essentiellement par le biais des données d'amplitude et de cohérence).

Dans la phase 5, l'analyse de l'image d'amplitude, de l'interférogramme et surtout de l'image de cohérence permet, en complément d'autres données, de se faire une idée relativement fine des dégâts (Massonnet et al., 1993a).

2.2. Intégration des contraintes

2.2.1. Un constat : le cloisonnement des différentes contraintes

Un certain nombre de contraintes ont fait l'objet d'un inventaire (section 1.2), mais dans le contexte général de l'interférométrie différentielle et pas forcément dans la perspective d'une surveillance opérationnelle des risques géologiques. Il est donc nécessaire de mettre « bout à bout » toutes ces contraintes pour évaluer l'aptitude d'une chaîne complète d'acquisition et de traitement interférométrique pour ce type d'application.

Le panorama bibliographique montre que l'intégration des contraintes n'est jamais faite de manière systématique. Elle est faite au mieux au cas par cas et la plupart du temps elle ne figure pas dans les publications. Cette absence est probablement due au fait que la plupart de ces contraintes (par exemple, la difficulté d'avoir à la bonne saison un couple interférométrique acceptable ou encore le manque d'opérateurs qualifiés) sont considérées

comme des contingences liées aux conditions de l'expérience, qu'elles sont compensées par des redoublements d'efforts (plus de données, plus de travail, implication d'experts) et que, bien entendu, "on fera mieux la prochaine fois".

À la décharge des auteurs, une telle intégration est un travail impossible à réaliser de manière exhaustive car toutes les interactions entre contraintes sont à prendre en compte. Citons quelques-unes de ces interactions:

- la probabilité d'avoir une base stéréoscopique suffisamment faible est limitée (contrainte liée au contrôle d'orbite) ce qui entraîne des interférogrammes plus bruités et donc plus difficiles à dérouler (contrainte liée à la quantité et à la qualité de la main d'œuvre);
- pour un mouvement géophysique qui, en termes cinématiques, nécessiterait une base temporelle d'un mois, la cohérence est limitée par les modifications d'état de surface liés à la végétation et à l'eau, mais aussi aux éboulements en cas de pente forte;
- il est beaucoup plus facile d'acquérir un couple avec une base de 100 m qu'avec une base de 10 m, mais il faudra un MNT 10 fois plus précis (en termes d'erreur altimétrique) pour éliminer les franges topographiques;
- l'inversion de modèles paramétriques de déformation permet d'accéder à une mesure quantitative et spatialement continue, mais cette mesure est affectée par tous les phénomènes perturbateurs qui n'auront pas été explicitement exclus du modèles, en particulier les artefacts cohérents d'origine atmosphérique.

Gens et Van Genderen (1997) proposent d'aborder ce problème en modélisant la propagation de l'erreur, adoptant un formalisme général pour une approche souvent menée au cas par cas pour chaque perturbateur. Cette approche est intéressante, mais elle suppose que l'on soit capable de paramétrer toutes les sources potentielles d'erreur, ce qui est loin d'être le cas.

2.2.2. Un exemple : contraintes liées à l'élimination des franges topographiques

Considérons à titre d'exemple un problème particulier au sein de la chaîne de traitement interférométrique (l'élimination des franges topographiques) et montrons comment se combinent les contraintes sous-jacentes, à savoir:

- l'existence d'un MNT le plus précis possible (pour prédire les franges topographiques par simulation);

– la nécessité de minimiser la base stéréoscopique.

Ce cas est relativement simple, car les deux contraintes sont régies par des variables qui sont asservies en proportion inverse. En effet, l'erreur résiduelle sur l'interférogramme (exprimée ci-dessous en nombre de franges), que l'on souhaite minimiser, est proportionnelle au produit de la base stéréoscopique B_{perp} et de l'erreur altimétrique σ_z:

$$\frac{\sigma_\Phi}{2\pi} = \frac{2B_{perp}\sigma_z}{\lambda R \sin\theta} \tag{4}$$

Si nous considérons les paramètres instrumentaux des satellites ERS nous obtenons les erreurs données sur le tableau III (exprimées en nombre de franges).

TABLE III Effet de la précision du MNT sur la précision interférométrique

Base (m) \ Erreur MNT (m)	*1*	*10*	*100*	*1000*
2	0,00	0,00	0,01	0,11
7	0,00	0,00	0,04	0,38
20	0,00	0,01	0,11	1,09
70	0,00	0,04	0,38	3,82

Dans le cas d'un système comme ERS où la minimisation de la base stéréoscopique nécessite un grand nombre de tirages ou, ce qui revient au même, beaucoup de chance, la base doit être associée à un pourcentage (rappelons les chiffres de 6 % pour une base inférieure à 70 m, 2 % pour une base inférieure à 20 m, que nous extrapolerons à moins de 1% pour une base de quelques mètres).

Une erreur altimétrique de 1000 m correspond typiquement à l'absence de MNT sur des reliefs moyennement montagneux : on voit que cette absence totale de MNT (situation idéale en termes de coût) reste acceptable pour des bases de quelques mètres, mais ces situations sont rarissimes.

Une erreur altimétrique de 100 m correspond à des MNT que l'on peut réaliser à moindre coût avec des méthodes grossières (interpolation de cartes d'origines incertaines sur des régions montagneuses) : cette situation peu contraignante exige en contrepartie une base stéréoscopique inférieure, typiquement, à 20 m (6 % des cas).

Une erreur altimétrique de 10 m correspond à des MNT issus de méthodes de corrélation automatique à partir d'images HRV de SPOT par exem-

ple. Ces MNT sont coûteux mais ils permettent d'accepter environ un couple sur 10.

Une erreur altimétrique de 1 m correspond à une restitution photogrammétrique de haute précision à partir d'un couple de photographies aériennes : l'utilisation de telles données n'est concevable que pour l'élimination des franges topographiques sur une zone très limitée (par exemple un glissement de terrain), mais elle est valable quelle que soit la base stéréoscopique.

Il apparaît donc que les deux contraintes se compensent. Les ordres de grandeur cités ici correspondent à une exigence de précision relativement élevée (tolérance d'un dixième de frange, soit une erreur maximale d'environ 3 mm). En pratique, des erreurs supérieures peuvent rester acceptables, d'autant plus que les phénomènes atmosphériques conduisent souvent à des déphasages nettement plus importants. Précisons que tous ces commentaires supposent (encore une contrainte !) que l'on dispose d'une base temporelle telle que les erreurs de phases dont il est fait mention soient toujours nettement inférieures au signal interférométrique mesuré (lié à la déformation).

Lorsqu'un MNT de qualité raisonnable n'est pas disponible, l'approche classique envisagée est l'acquisition d'une troisième image radar destinée à fournir un deuxième couple interférométrique, sensible le plus possible cette fois au relief, ce qui se traduit par de nouvelles contraintes sur la base stéréoscopique, sur l'intervalle de temps et sur les conditions d'acquisition, de livraison et de traitement.

2.2.3. Recommandations pour l'intégration des contraintes

Ces quelques exemples suggèrent quelques recommandations fondamentales:

- ne pas cloisonner les différentes étapes;
- ne pas fournir aux intermédiaires des produits interférométriques dont ils ignorent la genèse;
- ne pas exclure les utilisateurs de la spécification.

Autrement dit, il convient de conserver une vision d'ensemble sur toute la chaîne d'acquisition et de traitement. Cette vision d'ensemble ne peut pas s'improviser, pour des raisons techniques mais aussi culturelles (les différentes communautés scientifiques ayant des jargons différents et des visions différentes du problème). On doit cependant pouvoir envisager de

mener un travail d'équipe pluridisciplinaire ou d'exploiter des outils comme les simulateurs d'images. Ceci est indispensable pour spécifier et développer les procédures à suivre pour étudier des phénomènes géologiques par interférométrie différentielle, ainsi que pour aboutir à une estimation fiable des performances de cette technique dans un contexte opérationnel.

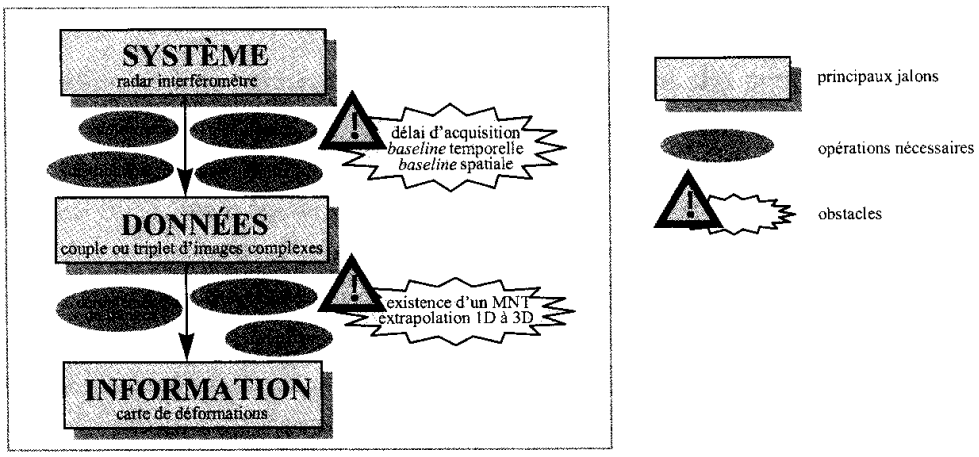


FIGURE 2 Du signal à l'information

On retrouve les principales de ces contraintes sur la figure 2, sur laquelle on distingue les deux principales phases de la chaîne de traitement interférométrique :

- du système à la donnée (phases de spécification et d'acquisition);
- de la donnée à l'information (phases de traitement).

Nous montrerons à la section 2.5 que ces recommandations peuvent être étendues à un domaine plus ambitieux encore : de l'acquisition à la décision politique. En effet, à quoi sert la surveillance des déformations du sol si ce n'est à alimenter des prises de décisions face à d'éventuelles catastrophes géologiques ?

2.3. Comparaison à d'autres techniques

2.3.1. Généralités

Dès que l'interférométrie différentielle a donné lieu à des démonstrations de faisabilité, on a naturellement cherché à comparer ses résultats avec

ceux de techniques déjà mises en oeuvre. Cette comparaison est intéressante, à condition qu'elle prenne en compte à la fois deux types de critères:

- critères géométriques:
  - précision (relative et absolue) de la mesure de déplacement,
  - effets directionnels,
  - densité des points de mesure;
- critères opérationnels:
  - coût,
  - difficulté de mise en œuvre,
  - vulnérabilité de l'infrastructure face au risque.

Il faut cependant se méfier d'une telle comparaison, car son statut de technique émergente confère à l'interférométrie différentielle à la fois des avantages et des inconvénients:

- avantage : elle est mise en œuvre dans un contexte expérimental avec tous les moyens techniques et intellectuels nécessaires au succès de l'expérience, et les auteurs ne sont soumis à aucune pression et à aucune responsabilité socio-économique;
- inconvénient : elle ne bénéficie pas encore d'une longue expérience, les experts sont peu nombreux, et les résultats encore difficiles à prédire, comme on cherche à le montrer dans toute cette étude.

Nous donnons ci-après quelques éléments de comparaison entre l'interférométrie radar différentielle et les techniques de mesure les plus utilisées, celles-ci ayant été décrites par Kasser (1997).

2.3.2. Topométrie terrestre

La topométrie terrestre utilise des techniques extrêmement précises, traditionnellement divisées en deux domaines, à savoir les mesures altimétriques (ou nivellement) et les mesures planimétriques (triangulation et télémétrie).

Le nivellement est une technique très lourde à mettre en oeuvre et donc très onéreuse, mais elle est très précise, jusqu'à 0,1 mm d'erreur sur une dénivelée entre deux points distants de 1 km. Elle constitue donc la référence pour la mesure de déformations du sol.

Les mesures planimétriques sont plus rapides à mettre en oeuvre, surtout depuis de développement de théodolites motorisés qui fournissent des

mesures de distance et d'angle en continu. Les erreurs planimétriques se divisent en deux termes:

- un terme constant, de quelques mm pour les mesures électroniques de distance;
- un terme proportionnel à la distance, de quelques mm/km, lié à la mauvaise connaissance de l'indice de réfraction de l'air, l'atmosphère étant très turbulente au niveau du sol.

On voit donc que l'interférométrie est loin d'être la seule technique à être pénalisée par l'atmosphère.

2.3.3. Télémétrie laser aéroportée en champ large

L'Institut géographique national a mis au point, avec la collaboration scientifique de l'ESGT et le soutien financier d'Elf Aquitaine et de l'Institut national des sciences de l'univers, une méthode de mesure de déformations utilisant un laser aéroporté à large champ au-dessus d'un terrain sur lequel sont disposés des réflecteurs (Bock *et al.*, 1998, 1999). Le laser à champ large permet d'acquérir simultanément plusieurs mesures de distances entre le système embarqué en avion et un réseau de rétroréflecteurs placés au sol sur une grille approximativement régulière dont la maille mesure de 100 m à 1 km. La précision théorique du positionnement différentiel est de 1 mm en altimétrie et 4 mm en planimétrie. Des expérimentations terrestres ont permis de mettre au point la méthode et de confirmer cette précision. Une expérimentation aérienne plus complète a été réalisée en 1998 sur un réseau de 64 cibles couvrant 1 km2. Le traitement des données, en cours actuellement, devrait également confirmer ces performances. L'avantage de cette technique par rapport aux techniques radioélectriques telles que le GPS et le SAR est son insensibilité à la vapeur d'eau atmosphérique, ce qui permet d'atteindre des précisions de positionnement meilleures d'un facteur 10. De plus, un survol de 2 à 3 heures est suffisant pour atteindre ces précisions, c'est donc une méthode quasi-instantanée. Sa contrainte majeure est la nécessité de cibles coopératives au sol. Toutefois, dans un contexte opérationnel, il peut être justifié d'équiper un terrain pour en faire une surveillance régulière (tous les mois, voire toutes les semaines). Sa grande précision devrait en faire une technique privilégiée pour l'étude des déformations lentes et la détection de précurseurs sismiques.

2.3.4. GPS

La précision inhérente au système GPS, de l'ordre de 10 à 100 mètres, est sans intérêt pour les applications géophysiques. C'est donc exclusivement en mode différentiel (et avec mesure de phase) que l'on utilise les récepteurs pour ces applications : si deux ou plusieurs récepteurs captent les mêmes satellites simultanément et de manière continue pendant plusieurs heures, le vecteur joignant deux antennes peut être calculé avec une précision centimétrique. L'approche différentielle a notamment pour effet d'éliminer l'incertitude sur la position des satellites, qui est typiquement de quelques mètres.

Le cas des techniques GPS est intéressant à étudier car, utilisant des longueurs d'onde du même ordre de grandeur que l'interférométrie radar et consistant en des mesures géométriques comme elle, les sources d'erreur sont les mêmes, à savoir essentiellement la connaissance de l'orbite des satellites et la connaissance de l'indice de réfraction troposphérique (essentiellement limitée par la variabilité du contenu en vapeur d'eau) et ionosphérique. En pratique, le signal GPS (bande L) est plus sensible à l'ionosphère mais moins sensible à la troposphère et à la végétation que le signal radar d'un système comme ERS ou Radarsat (bande C).

2.3.5. Photogrammétrie différentielle

Dans de nombreux pays du monde, des photographies aériennes à échelle moyenne (typiquement du 1: 20 000 au 1: 30 000) sont disponibles depuis les années 1950. Une restitution photogrammétrique sur des zones potentiellement ou effectivement instables permet d'avoir un état initial, nécessaire au suivi. De même, des acquisitions plus récentes peuvent donner lieu à des restitutions répétées. Cette approche, beaucoup moins précise que les autres (sauf pour des échelles beaucoup plus grandes qui ne peuvent être acquises que lors de survols spécifiquement programmés) a l'avantage d'être très bien maîtrisée en termes opérationnels et de couvrir des intervalles de temps beaucoup plus longs.

L'ESGT mène des recherches sur l'opportunité de faire voler un capteur numérique léger sur un avion télécommandé. Cette approche, très prometteuse en termes de performances, présente l'avantage de ne pas impliquer d'opérateur sur le terrain dans des zones potentiellement à haut risque.

Il est théoriquement possible et potentiellement très précis de mesurer directement, par corrélation automatique, des parallaxes entre des photographies aériennes prises à des dates différentes dans des conditions géo-

métriques proches. L'inconvénient d'une telle méthode est qu'elle ne donne que le déplacement projeté sur un plan perpendiculaire à l'axe de visée (même genre de contrainte que pour l'interférométrie différentielle qui n'est sensible qu'aux déplacements le long de l'axe de visée). Nous n'avons pas trouvé de référence sur ce type d'approche.

2.3.6. Photo-interprétation et utilisation d'images radar en amplitude

La photo-interprétation ne constitue pas à proprement parler une technique de mesure de mouvements (sauf pour des déplacements de plusieurs mètres, mais ce n'est pas l'ordre de grandeur qui nous intéresse ici). Cependant, l'interprétation d'images aériennes ou spatiales peut compléter utilement des mesures de mouvements en fournissant un suivi du comportement du paysage.

Citons dans cette section les images radar en amplitude, d'autant plus que ces dernières sont obligatoirement disponibles et sans coût additionnel lorsqu'on fait de l'interférométrie. Les images radar en amplitude, sensibles à la pente, à la rugosité et à certaines caractéristiques du sous-sol, peuvent s'avérer précieuses pour une interprétation géologique (Jaskolla *et al.*, 1985; Chorowicz *et al.*, 1995; Deroin et Scanvic, 1995). Dans le domaine des risques géologiques, ces données peuvent être utilisées pour détecter, cartographier et suivre des lignes de fractures, des zones d'arrachement. L'apport de l'image d'amplitude pour le suivi des risques hydro-géologiques, synthétisé par Buchroithner et Granica (1997), mérite donc d'être pris en compte y compris lorsque les données radar sont envisagées pour une mise en oeuvre interférométrique. La fusion d'images d'amplitude, de cohérence et de déphasage, testée dans le contexte de la cartographie de l'occupation du sol (Wegmuller and Werner 1995), n'a pas été testée à notre connaissance pour les risques géologiques.

Bien que cette approche soit elle aussi soumise à d'importantes contraintes opérationnelles (liées principalement à la géométrie d'acquisition), elle mériterait d'être plus souvent associée aux démonstrations de faisabilité de l'interférométrie différentielle.

2.3.7. Comparaison à deux techniques opérationnelles

Sur le tableau IV, on synthétise les caractéristiques comparatives de l'interférométrie différentielle et de deux techniques que l'on peut aujourd'hui considérer comme opérationnelles : la topométrie terrestre (basée notam-

ment sur des outils de mesure de distance et d'angle) et le positionnement par GPS différentiel. Les critères « continuité spatiale de l'information » et « observation globale » montrent la nécessité d'avoir une bonne connaissance de l'étendue du phénomène avant d'installer le système de surveillance. On peut donc envisager l'interférométrie radar différentielle comme un outil d'étude préliminaire, destiné à optimiser l'implantation d'un système de surveillance plus opérationnel.

Le coût n'est pas mentionné parmi les critères de comparaison. En effet, si la topométrie terrestre semble à première vue être la technique la plus coûteuse, il faut rappeler que les utilisateurs du système GPS ne supportent pas le coût du segment spatial, et que les données radar spatiales sont distribuées tantôt gratuitement dans le cadre de projets pilotes, tantôt à des prix fixés articiellement et ne reflétant pas le coût de revient du système.

2.4. Facteurs géographiques

Dans la mesure où les satellites survolent (presque) toutes les régions du globe, où les risques géologiques menacent des sites répartis dans le monde entier et où le marché des produits et services liés à l'interférométrie radar ne peut se concevoir que dans un contexte planétaire, il est légitime de se demander comment les remarques générales apportées jusqu'ici doivent être modulées en fonction des régions du monde.

Un certain nombre de facteurs géographiques sont en effet susceptibles d'affecter les performances de l'interférométrie différentielle pour le suivi des risques géologiques. Nous n'avons pas abordé en détail cette question, faute de temps et de données. Cependant, nous pouvons énoncer ici les principaux critères à prendre en compte :

- les risques géologiques ne sont pas homogènes spatialement sur la Terre, or c'est seulement dans les régions où ces risques sont significatifs (que ce soit par le danger ou par la vulnérabilité des lieux) que les questions que nous nous sommes posées dans cette étude ont un sens; il faudrait à ce stade s'appuyer sur une carte mondiale des risques géologiques; si les glissements de terrain sont ponctuels et peuvent survenir n'importe où dans le monde, il n'en va pas de même pour les séismes et les éruptions volcaniques dont la menace est concentrée dans certaines régions;

TABLEAU IV Comparaison de l'interférométrie radar à deux techniques opérationnelles de mesure de déformation

	topométrie terrestre	*GPS différentiel*	*interférométrie radar différentielle*
précision absolue	millimétrique	centimétrique	centimétrique possible mais rare
continuité spatiale de l'information	information ponctuelle	information ponctuelle	information continue
effets directionnels	oui	oui	oui
indépendance du référentiel local	non	oui	oui
observation globale	non	non	oui
accès à déplacements très rapides	oui	oui	non
accès à déplacements très lents	oui	oui	non
vulnérabilité face au risque	oui	oui	non
échantillonnage temporel	continu	continu	plusieurs jours à plusieurs mois

- la latitude a un effet sur la base stéréoscopique (Solaas, 1994); il semble que les hautes latitudes soient favorables à des acquisitions plus nombreuses et plus adaptées en termes de base stéréoscopique; le filtrage qui consiste à sélectionner certaines valeurs de la base peut réduire considérablement le nombre de scènes retenues, mais ne modifie pas sensiblement les proportions entre les différentes régions;
- la remarque précédente doit être également modulée par la distribution spatiale des stations : en effet, dans l'état actuel de la technologie, l'acquisition de données radar par satellite reste encore fortement tributaire de la position et du fonctionnement des stations de réception; nous avons peu d'informations à ce sujet, mais il semble que certaines régions soient nettement défavorisées par rapport à d'autres; cette question devient encore plus critique lorsqu'on considère l'interférométrie différentielle dans un contexte opérationnel, mettant en cause non seulement l'acquisition mais aussi la rapidité de la livraison et du traitement, ainsi que la qualification des opérateurs dans les phases amont du processus;
- on a vu que la disponibilité d'un MNT et de quelques points d'appui était un avantage pour l'interférométrie différentielle; or, l'existence d'une cartographie détaillée est l'apanage de quelques pays petits ou riches; ceux-là sont sans doute aussi les mieux couverts en termes de stations de réception;
- cette inégalité face à la technologie est même aggravée par une inégalité face au risque; en effet, « les catastrophes sont injustes. Elles frappent généreusement les plus démunis qui ignorent le risque, comme les travailleurs saisonniers de Char Jabba ou les mineurs retraités du Wyoming » (Ducret, 1994);
- enfin, indépendamment de tout mouvement potentiel ou existant, le type de paysage a de toute évidence un impact considérable sur la possibilité de mesurer les déplacements par interférométrie différentielle; les caractéristiques suivantes méritent d'être considérées :
  - le **relief** (les régions montagneuses étant plus contraignantes en termes de correction des effets topographiques et présentant des zones d'ombre ou de *layover* inexploitables ainsi que des pertes de cohérence en cas de base trop importante);
  - le **climat** (les régions humides étant pénalisées par des artefacts d'origine troposphérique plus ou moins cohérents difficiles à séparer du signal utile);

- la **végétation** (les régions boisées étant affectées par des pertes de cohérence liées au mouvement irréguliers des feuillages).

2.5. L'interférométrie différentielle dans un contexte opérationnel: de l'acquisition à la décision

2.5.1. La surveillance dans le contexte de la gestion des risques : une situation délicate

Dans tout ce qui précède, nous avons considéré l'interférométrie radar différentielle dans le cadre d'une chaîne opérationnelle qui va de l'acquisition d'un signal à la production d'une information, en l'occurrence une carte de déformations. Or, si nous voulons évaluer l'avenir de cette technique en termes de débouchés opérationnels et commerciaux, nous devons la replacer dans le contexte de la prise de décision.

Malheureusement, si nous savons modéliser le comportement d'un système spatial d'observation et, dans une moindre mesure, le comportement d'un phénomène géologique, la stratégie d'un décideur ne peut être modélisée aussi simplement, en raison de deux difficultés majeures:

- la connaissance des phénomènes géologiques et de leurs conséquences éventuelles s'appuie sur une démarche scientifique complexe, en tout cas hors de portée de la plupart des décideurs politiques, et peu compatible avec le cloisonnement habituel entre disciplines scientifiques.
- les décisions qui portent sur l'environnement en général et sur les risques naturels en particulier se heurtent à des sensibilités de nature subjective, irrationnelle, voire superstitieuse ou religieuse, généralement incompréhensibles dans nos cultures professionnelles.

Face à la première difficulté, l'interférométrie radar et, plus généralement, les moyens de surveillance par satellite, peuvent apporter des éléments de réponse. Encore faut-il que scientifiques et politiques sachent adopter un langage commun, ce qui dans la pratique échoue à peu près toujours. D'où une certaine ambigüité dans l'identification des responsabilités entre experts et décideurs.

Face à la deuxième difficulté, nos disciplines scientifiques sont impuissantes, ce qui ne nous dispense pas de la comprendre et de la prendre en compte. Toute analyse poussée de la notion de risque naturel nous ramène inévitablement à des questions fondamentales de nature sociologique, voire anthropologique.

2.5.2. Le rôle et la responsabilité des scientifiques

L'expertise scientifique peut-elle aider la décision? Dans le domaine de l'environnement, la science est nécessaire à toutes les décisions. Pourtant, même lorsque les connaissances requises sont disponibles, elles n'ont généralement pas la faculté intrinsèque d'appuyer les décisions, soit parce qu'elles sont mal perçues, soit parce qu'elles n'ont pas été conçues pour répondre à la question posée, d'où des conséquences négatives trop bien connues (surinformation ou, au contraire, rétention d'information, connaissances difficilement compréhensibles par des non scientifiques, cloisonnement hermétique entre les différentes disciplines scientifiques, etc.).

Tazieff et Sabroux (1990) remettent la surveillance à sa juste place:

> « la mise en oeuvre des moyens de surveillance appropriés, la formation de volcanologues de terrain compétents ainsi que l'éducation des populations concernées : telles sont les conditions indispensables d'une politique efficace de prévention dont le coût, qui a pourtant toujours constitué un frein à son développement, est de toute évidence dérisoire face aux conséquences économiques et sociales des évacuations intempestives et des catastrophes volcaniques à venir. Ces propos, qui sont très justes, demeurent néanmoins théoriques car ils sous-estiment encore la difficulté du dialogue entre scientifiques et politiques ».

Un aménagement doit-il résister à tout (il aura alors un coût théoriquement infini) ou peut-on faire l'impasse sur des circonstances exceptionnelles (pluie centenaire, séisme de magnitude 8, etc.)? C'est une question que le décideur doit se poser en connaissance de cause, car elle engage sa responsabilité. Les scientifiques n'ont pas pour prérogative de répondre à cette question, mais ils seront inévitablement sollicités pour prédire l'impact des situations extrêmes envisagées.

Kasser (1997) envisage ce problème sous l'angle de la déontologie. En effet,

> « le scientifique dispose d'informations nécessairement très partielles (les mesures) sur un système physique très complexe. Sa perception du phénomène en cas d'imminence de la catastrophe conserve donc des aspects subjectifs majeurs.

> Comment le politique doit-il réagir dans ce type de cas ? Il écoute le scientifique et prend des décisions ayant parfois de lourdes conséquences économiques. Si le scientifique communique ses sentiments et ses incertitudes directement à la presse, le politique perd toute possibilité d'action maîtrisée. De ce fait la relation scientifique-politique devient très dissymétrique, et dans certains cas elle a pu conduire à de véritables conflits, dommageables aux deux parties. Il est donc important qu'une déontologie du scientifique impliqué dans une surveillance de phénomène naturel à haut risque soit établie, permettant de s'y référer sans avoir à repenser toutes les obligations générales de chacun en période de crise ».

Pour accroître les performances opérationnelles de l'interférométrie différentielle, il faut donc rapprocher les discours scientifique et politique. Cela passe notamment par un apprentissage de l'utilisation d'interférogrammes car ces produits ont encore une signification ésotérique accessible aux seuls experts. Capes *et al.* (1996) ont montré qu'après un séisme de magnitude 6,6 survenu en mai 1995 sur le Nord de la Grèce, l'interférogramme différentiel présentait d'importantes similitudes spatiales avec une carte des dégâts (pourcentage des bâtiments détruits) : ce genre de comparaison est propice à améliorer la compréhension des interférogrammes.

2.5.3. Perception sociale d'une catastrophe géologique

Nous avons rappelé plus haut qu'une catastrophe géologique n'était pas seulement un phénomène physique (éruption volcanique, séisme, glissement de terrain) mais aussi l'exposition d'une zone vulnérable à ce phénomène. En réalité (et cette nuance est particulièrement importante dans le cadre d'une décision d'aménagement ou d'évacuation) un autre phénomène, beaucoup plus subjectif celui-la, doit être pris en compte lorsqu'on parle de catastrophe : il s'agit de la perception du risque par la société.

Cette perception est très variable d'un individu à l'autre et surtout d'une région à l'autre car elle est essentiellement culturelle, liée à l'histoire (souvenir populaire des catastrophes passées, etc.) et à la relation qu'entretiennent les populations avec le milieu naturel. À la liste des facteurs géographiques, on pourrait donc rajouter un facteur de sensibilité sociale, celui-ci influençant indirectement la manière dont seront reçus les résultats de l'interférométrie.

L'enchaînement des contraintes qu'il faut prendre en compte pour que des données interférométriques puissent contribuer à une prise de décision est synthétisé sur la figure 3.

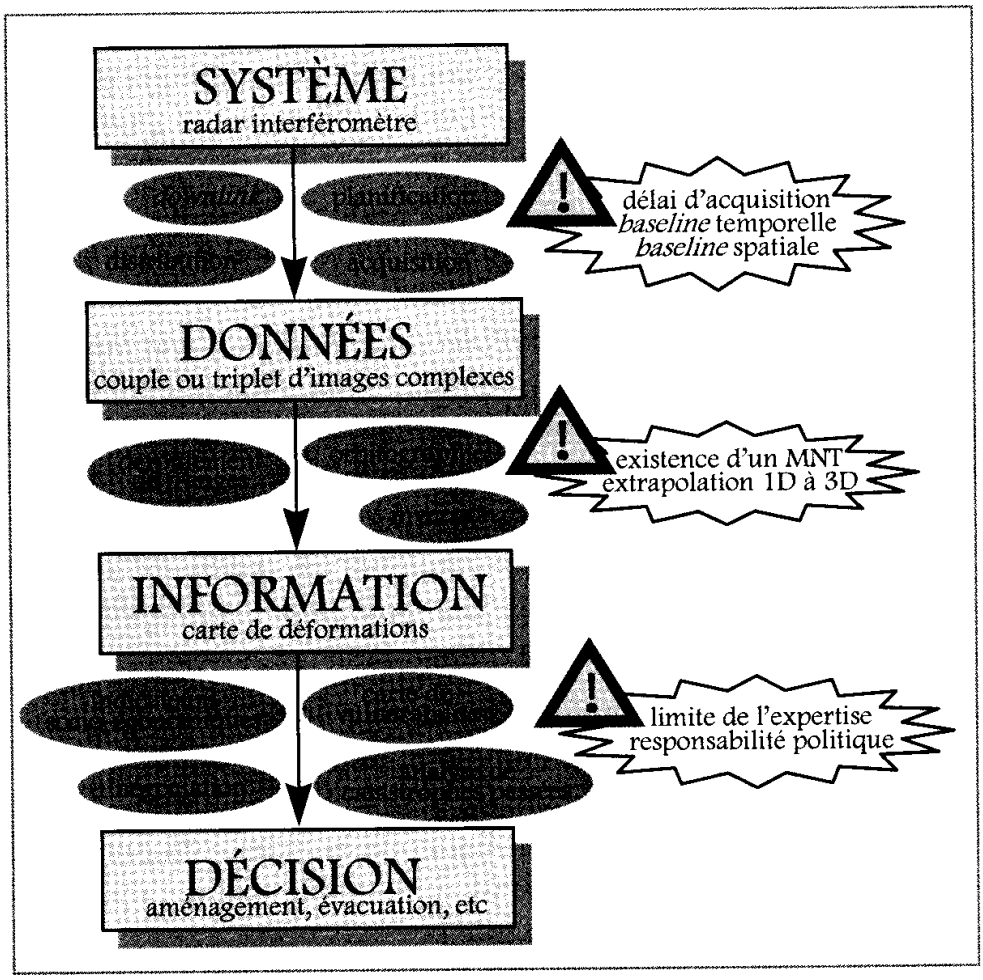


FIGURE 3 Du signal à la décision

3. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Nous nous sommes efforcés de mettre en évidence le fossé qui existe entre la maturité théorique de l'interférométrie différentielle et son immaturité opérationnelle. Même si la perspective d'applications solvables a été un moteur pour les recherches algorithmiques, force est de constater que le transfert vers les utilisateurs ne s'est pas fait. On assiste même à un véritable dialogue de sourds entre les spécialistes des technologies spatiales qui

attendent des spécifications de besoin claires pour passer à un stade industriel et des utilisateurs opérationnels qui attendent qu'on leur dise plus clairement quelles techniques on peut utiliser et avec quelles performances. Ce malentendu est aggravé par des idées caricaturales et trompeuses, répandues dans nos professions, sur les notions d'utilisateur et d'application de la télédétection. À quel stade intermédiaire entre l'acquisition et la décision, doit-on parler d'utilisateur? Quels produits doit-on faire figurer sur les catalogues? Qui doit payer les données? Il faut croire que nous n'avons pas su répondre à ces questions, lorsqu'on considère à quel point les données, dont le prix est dérisoire en regard des enjeux économiques, sont délaissées par leurs clients potentiels.

Dans les pages qui précèdent, nous avons évoqué le problème de la prise de décision face aux risques géologiques. **Seule cette approche peut désormais éclairer les développements algorithmiques, les études de marché et les conceptions de solutions industrielles**.

Nous menons dans le cadre du projet ADAGE (Aide à la Décision en Aménagement et Gestion de l'Environnement), en partenariat avec des interlocuteurs techniques mais également politiques, trois projets pilotes dans le domaine de la gestion de l'environnement:

- gestion d'un barrage dans une région agricole du Finistère;
- gestion de la collecte des déchets dans une agglomération en pleine mutation, Lisbonne;
- gestion des risques d'inondation en milieu urbain dans l'agglomération de Cayenne (Guyane française).

Dans des contextes environnementaux et politiques aussi variés, nous aboutissons toujours à la même conclusion : la recherche de la solution doit toujours partir de la perception sociale du problème. À n'en pas douter, c'est par cette approche et en complémentarité avec d'autres techniques, que l'interférométrie radar pourra trouver sa place dans la panoplie des moyens de surveillance des risques géologiques.

4. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le CNES qui apporté un soutien financier à cette étude dans le cadre du programme AVALSAR. Nous remercions également Olivier Bock, maître de conférences à l'ESGT, pour les précisions

qu'il a apportées, et Frédéric Adragna, chef du Département Systèmes Radar au CNES, pour sa disponibilité et pour l'éclairage qu'il nous a apporté sur certaines subtilités du traitement interférométrique. Enfin, nous tenons à remercier Hugh Gwyn et Jean-Marie Dubois pour leur relecture attentive.

Références

Achache, J., Fruneau, B. and Delacourt, C. (1995) Applicability of SAR interferometry for operational monitoring of landslides. *Proceedings of Second ERS Applications workshop, London, Dec. 1995*, p. 165–168.

Bock, O., Kasser, M., Thom., C. and Pelon, J. (1998) Study of wide angle laser ranging system for relative positioning of ground-based benchmarks with millimeter accuracy. *Journal of Geodesy*, vol. 72, n° 7/8, p. 442–459.

Bock, O., Thom., C., Kasser, M. and Pelon, J. (1999) Multilateration with the wide angle laser ranging system : ranging performance and first ground-based validation experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, n° 2, p. 739–747.

Buchroithner, M. and Granica, K. (1997) Applications of imaging radar in hydro-geological disaster management : a review. *Remote Sensing Reviews*, vol. 16, p. 1–134.

Capes, R. (1996) CivInSAR : an integration of differential SAR interferometry into a GIS to assist in earthquake damage assessment and remediation management. *GRSG-EARSeL joint meeting on Remote Topographic Mapping for Geoscience*, Nottingham, Dec. 1996 (non publié).

Chorowicz, J., Koffi, B., Chalah, C., Chotin, P., Collet, B., Poli, J.T., Rudant, J.P., Sykioti, O. et Vargas, G. (1995) Possibilités et limites de l'interprétation géologique des images (SAR) ERS-1. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 138, p. 82–95.

Coulson, S. and Solaas, G. (1993) SAR interferometry with ERS-1. *in De l'Optique au Radar : les Applications de SPOT et ERS*. Cépaduès-Editions, Toulouse, p. 457–472.

Deroin, J.P. et Scanvic, J.Y. (1995) Apport de l'imagerie radar à la cartographie géologique. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 138, p. 96–109.

Ducret, B. (1994) White, Burton, Kates, Saarinen et les autres. *in Enseigner les Risques Naturels – Pour une Géographie Physique Revisitée*, Anthropos/GIP RECLUS, Paris, p. 81–99.

Dupont, S., Nonin, P., Pichon, G. et Renouard, L.(1997) Artefacts atmosphériques : une limitation pour la génération de MNT inRSO ERS. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 146, p. 6–14.

Gabriel, A. and Goldstein, R. (1988) Crossed orbit interferometry : theory and experimental results with SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n° 5, p. 857–873.

Gabriel, A., Goldstein, R. and Zebker, H. (1989) Mapping small elevation changes over large areas : differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, n° B7, p. 9183–9191.

Gens, R. and Van Genderen, J. (1997) An approach of error propagation modelling of SAR interferometric data. *Proceedings of 'Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry, Zürich, 30 sept. – 2 oct. 1996* (ESA SP-406), p. 331–333.

Goldstein, R., Engelhardt, H., Kamb, B. and Frolich, R. (1993) Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctica ice stream. *Science*, vol. 262, p. 1525–1530.

Jaskolla, F., Rast, M. and Bodechtel, J. (1985) The use of SAR systems for geological applications. *Workshop on Thematic Applications of SAR Data, Frascati, Sept. 1985* (ESA SP-257) p. 41–50.

Jouck, B. (1997) Performances de l'interférométrie radar pour le suivi des risques géologiques. Rapport de stage, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, France.

Kasser, M. (1997) La mesure des mouvements du sol par méthodes géodésiques. *Bulletin d'Information de l'IGN*, n° 66, p. 51–57.

Madsen, S., Zebker, H. and Martin, J. (1993) Topographic mapping using radar interferometry : processing techniques. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, n° 1, p. 246–256.

Massonnet, D. (1985) Etude de principe d'une détection de mouvements tectoniques par radar. Rapport interne CNES CT/PF/TI/AS N° 326 du 16 novembre 1985, Toulouse.

Massonnet, D. and Rabaute, T. (1993) Radar interferometry : limits and potential. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, n° 2, p. 455–464.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993a) The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, vol. 364, p. 138–142.

Massonnet D., Rognon, B. et Carmona, C. (1993b) Évaluation des changements de phase de surface sur de grandes zones. *In De l'Optique au Radar : les Applications de SPOT et ERS*. Cépaduès-Editions, Toulouse, p. 473–481.

Massonnet, D., Briole, P. and Arnaud, A. (1994a) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, vol. 375, p. 567–570.

Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M. and Adragna, F. (1994b) Radar interferometric mapping of the deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, vol. 369, p. 227–230.

Massonnet, D. (1995) Limitations to SAR interferometry due to instrument, climate or target geometry instability. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, vol. 4, n° 2, p. 19–25.

Massonnet D. and Feigl, K. (1995) Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophysical Research Letters*, vol. 22, n° 12, p. 1537–1540.

Mouginis-Mark, P. (1995) Preliminary observations of volcanoes with the SIR-C radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, n° 4, p. 934–941.

Polidori, L. (1995) Apport de la simulation d'images à la validation des techniques de cartographie radar. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 138, p. 16–25.

Polidori, L., Caillault, S. and Canaud, J. (1995) Change detection from radar images : methods and operational constraints. *Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Florence, Jul. 1995*, p. 1529–1531.

Polidori, L. (1997) *Cartographie radar*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 303 p.

Prati, C. and Rocca, F. (1990) Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, n° 12, p. 2215–2235.

Prati. C., Rocca, F., Monti Guarnieri, A. and Damonti, E. (1990) Seismic migration for SAR focusing : interferometrical applications. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, n° 4, p. 627–640.

Prati, C., Rocca, F. and Monti Guarnieri, A. (1992) SAR interferometry experiments with ERS-1. *Proceedings of the First ERS-1 Symposium – Space at the Service of our Environment, Cannes, Nov. 1992* (ESA SP-359) p. 211–218.

Société Française de Photogrammétrie et Télédétection (1998) Compte Rendu du Séminaire "Formation en Photogrammétrie et en Télédétection". *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* n°150, p. 39–43.

Solaas G. (1994) ERS-1 interferometric baseline algorithm verification. Document ESA/ESRIN ref. ES-TN-DPE-OM-GS02, Frascati, 69 p.

Tarayre H. (1996) Extraction de modèles numériques de terrain par interférométrie radar satellitaire : algorithmie et artefacts atmosphériques. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Tazieff, H. et Sabroux, J.C. (1990) Éruptions volcaniques. *In Encyclopaedia Universalis*, Paris, p. 655–660.

Vachon, P., Geudtner, D., Gray, L. and Touzi, R. (1995) ERS-1 synthetic aperture radar repeat-pass interferometry studies : implications for RADARSAT. *Journal Canadien de Télédétection*, vol. 21, n° 4, p. 441–454.

Vachon, P., Geudtner, D., Mattar, K., Gray, L., Brugman, M. and Cumming, I. (1996) Differential SAR interferometry measurements of Athabasca and Saskatchewan glacier flow rate. *Journal Canadien de Télédétection*, vol. 22, n° 3, p. 287–296.

Wegmuller, U. and Werner, C. (1995) Farmland monitoring with SAR interferometry. *Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Florence, 1995), p. 544–546.

Werner, C., Hensley, S., Goldstein, R., Rosen, P. and Zebker, H. (1992) Techniques and applications of SAR interferometry for ERS-1 : topographic mapping, change detection and slope measurement. *Proceedings of 1st ERS-1 Symposium, Cannes, Nov. 1992* (ESA SP-359), p. 205–210.

Zebker, H. and Goldstein, R. (1986) Topographic mapping from interferometric SAR observations. *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, n° B5, p. 4993–4999.

Zebker, H. and Villasenor, J. (1992) Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 5, p. 950–959.