Université de Liège

Faculté des sciences

Apport de l'interférométrie radar dans la gestion des risques naturels.

Cas de Hanoi, VIET NAM

Rapport de master complémentaire en gestion des risques naturels

NOEL Aurélie

Promoteurs :

A. OZER (ULg)
F. NGUYEN (ULg)
P. OZER (ULg)

Année académique 2007-2008

Université de Liège

Faculté des sciences

Apport de l'interférométrie radar dans la gestion des risques naturels.

Cas de Hanoi, VIET NAM

Rapport de master complémentaire en gestion des risques naturels

NOEL Aurélie

Promoteurs :

A. OZER (ULg)
F. NGUYEN (ULg)
P. OZER (ULg)

Année académique 2007-2008

Remerciements

Mes plus vifs remerciements vont tout d'abord à mon promoteur, le professeur André OZER. Il m'a, à nouveau, fait confiance en ce qui concerne la démarche théorique pour la réalisation de ce travail. Il a su, également, me donner l'opportunité de réaliser une campagne de terrain dans le magnifique pays qu'est le Vietnam, expédition nécessaire à la validation de mes résultats et à l'épanchement de ma soif d'aventures.

J'aimerais également remercier les membres du jury, les professeurs Frédéric NGUYEN et Pierre OZER pour l'intérêt et j'espère le plaisir qu'ils auront eu à parcourir cette étude.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Marc SALMON, qui m'a supporté dans son laboratoire des mois durant et qui a pris le temps de répondre et solutionner chacun de mes questionnements. De la même manière, je suis reconnaissante à Bérangère CASSON et Frank LEGALL du support technique d'ENVI, logiciel avec lequel je n'étais pas du tout familiarisée et qui a, de ce fait, soulevé pas mal d'anicroches, qu'ils ont toujours su résoudre. Et enfin, Jean VAN CAMPENHOUT et sa grande disponibilité pour toutes sortes de manœuvres dont la relecture.

De la même manière, je suis reconnaissante à toute l'équipe de scientifiques de l'Institut des Sciences Géologiques de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam à Hanoi pour leur aide et leur convivialité, Mai Than TAN, Thrin Phan TRONG, Ngo VAN LIEM et Quan TRUNG.

Mes plus vifs remerciements s'adressent également à la Fondation Alice SEGHERS, pour les moyens financiers accordés dans le but de contribuer au bon déroulement de cette étude.

Bien sûr, je ne veux pas oublier ma famille et mes proches qui m'ont supporté (dans les deux sens du terme) tout au long de la réalisation de ce travail et à Nicolas-Xavier et Francis GEILFUS pour la relecture.

Introduction

Dans le cadre de la recherche partagée qui unit l'Institut des Sciences Géologiques de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam à Hanoi et le Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection de l'Université de Liège et dans le cadre des accords de coopération entre le Vietnam et la Région Wallonne en Belgique, l'étude par interférométrie radar de la subsidence de la ville de Hanoi et des risques induits a été réalisée.

Comment l'interférométrie radar peut-elle aider à la gestion des risques naturels ?
La ville de Hanoi est confrontée aujourd'hui à de nouveaux défis. La population de la zone urbaine, toujours plus nombreuse, exerce une pression non négligeable sur les ressources naturelles et se met elle-même en danger de ce fait. Deux risques majeurs coexistent : la subsidence et les inondations, l'un pouvant avoir une influence néfaste sur l'autre en accroissant la fréquence des crues débordantes et la hauteur de submersion des quartiers concernés.

En premier lieu, les nouveaux arrivants de la ville s'installent là où l'urbanisation galopante a laissé quelques parcelles non bâties pour de bonnes raisons, c'est-à-dire sur les berges d'un fleuve qui entre en crue chaque année au moment de la mousson. Même si la ville est protégée depuis des siècles par un réseau important de digues et que d'autres structures sont en place pour réduire l'aléa, la vulnérabilité, elle, ne fait que s'accroître. Les efforts faits pour renforcer le réseau de protection ont créé l'illusion d'une diminution du risque (en effet, la probabilité d'une crue susceptible de passer au-dessus de cette protection est plus faible qu'auparavant). Mais du fait de l'évolution de l'occupation des sols dans le delta du Fleuve Rouge ainsi protégé des crues annuelles et de l'augmentation de la valeur des biens installés, en cas de crue très exceptionnelle et de saturation des systèmes de protection, le risque de rupture ne sera pas écarté et les dégâts économiques potentiels seront sans commune mesure avec ce qui s'est déjà produit dans le passé. Que dire si ces mesures de sécurisation, d'une efficacité relative, sont affectées d'un phénomène de subsidence ?

En effet, la capitale surexploite ses nappes aquifères dans le but de subvenir aux besoins de la population et aux exigences du développement sans cesse croissant. Ces prélèvements massifs d'eau souterraine donnent lieu à un tassement du sous-sol de la ville et, en conséquence, une subsidence visible et menaçante. Pour estimer les lieux et la vitesse de subsidence du sol de manière précise et ainsi prévenir une potentielle catastrophe, une méthode fut mise au point durant les deux dernières décennies : l'interférométrie radar. Cette technique permet, entre autres choses, par l'exploitation de couples d'images et les caractéristiques des imageurs radar, de déterminer rigoureusement la localisation et l'amplitude des mouvements du sol. Ainsi, en localisant avec exactitude les sites affectés par la subsidence et en estimant précisément la vitesse de ce phénomène, on peut créer une carte d'aléa.

En superposant cette carte avec celle de vulnérabilité, on peut extraire une représentation précise des zones dites « à risque ». Et en la comparant avec une carte du risque d'inondation, le gestionnaire pourra juger de l'influence de la subsidence sur des espaces déjà soumis au risque de crues débordantes et voir s'il y a lieu d'agir dans le sens d'une gestion intégrée de ces deux risques naturels.

Mots clés : Subsidence, Hanoi, interférométrie radar

Abstract

As part of the cooperation between the Institute of Geologic Sciences of the Sciences and Technology Academy of Vietnam in Hanoi and the Geomorphologic and Remote Sensing Office of the University of Liege, and with the accords between Vietnam and the Walloon Region in Belgium, the radar interferometry study of the land subsidence in Hanoi and all resulting risks has been done.

How can radar interferometry help for the managing of natural hazards?

The city of Hanoi has to deal with new challenges. The population of the urban area, always greater, is applying a pressure on natural resources and puts itself in danger. Two major risks coexist: the soil subsidence and floods. The first element could have a fatal influence on the second by increasing the frequency of overflowed water levels and the submersion height in the related districts.

Firstly, the new inhabitants who are coming in the city take residence where anyone else has done it before and for good reasons: the riverside which is flowed every year during the monsoon. Even if the city is protected for centuries by an important network of dykes and that other structures has been built to reduce the hazard, the vulnerability is just increasing. All the new improvements done to enforce the network have created the illusion of a reduction of the risks (in fact, the probability of overflowing a repaired dyke is lower than before). But, the evolution of land use in the Red River delta newly protected and the enhancement of the installed real estate, in case of exceptional flood and saturation of protection systems, the risk of break will be imminent and the potential damage will reach a level never known before. What's the influence of subsidence on that kind of safety measures?

Indeed, the capital is pumping extensively in its aquifer to provide water to urban population and managing the demand induced by growing development. These heavy levies of underground water provide a compaction of the city basement and, as a consequence, a looming and visible subsidence. To assess the places and the speed of the land subsidence with accuracy and so, prevent a potential disaster, a method has been developed for the last two decades: the radar interferometry. This technique allows, among other things (by exploitation of images couples and features of the radar sensors) to check carefully the position and the value of the land's movements. So, it's possible to discover with accuracy the areas affected by subsidence and estimate precisely the speed of this phenomenon, we can create a map. Overlying this one with a vulnerability map, we can acquire a perfect representation of "risk areas". And if we compare it with a flood risk map, the management service can easily assess if the subsidence have influence on areas already exposed to the overflowing risk and estimate the necessity or not to act for an integrated management of this two natural hazards.

Keywords: subsidence, Hanoi, radar interferometry

Pas d'accentuation vietnamienne
▲ *: information importante*
Ξ : hypothèse posée par l'utilisateur pour faciliter les traitements

Table des matières

REMERCIEMENTS **5**
INTRODUCTION **7**
ABSTRACT **8**
TABLE DES MATIERES **9**
PARTIE 1. PRESENTATION DES CONCEPTS ET DE LA METHODOLOGIE **11**
A. HANOI, CAPITALE DU VIETNAM, UNE « SINKING CITY » 13
1. Le Vietnam: selon Jusseret, 2006 ..... *13*
1.1 Généralités 13
1.2 Cadre physique 13
2. Le delta du Fleuve Rouge *15*
2.1 Géomorphologie 15
2.2 Géologie 15
3. Hanoi *17*
3.1 Généralités 17
3.2 Cadre physique 17
B. PHÉNOMÈNE DE SUBSIDENCE 21
1. Généralités *21*
2. Explication théorique du phénomène *21*
3. Liens de la localisation et des taux de la subsidence *23*
3.1 Avec la localisation des stations de pompage 23
3.2 Avec les propriétés géophysiques des sols 23
3.3 Avec le cycle saisonnier 23
3.4 Avec le contexte tectonique de delta 25
4. Autres études *25*
C. RADAR ET INTERFÉROMÉTRIE RADAR : 29
1. Principes d'acquisition *29*
1.1 Plate forme spatioportée 31
1.2 Image « simple » en sortie 35
1.3 Interférométrie radar 39
2. Etapes du processus *47*
2.1 Etapes préalables 47
2.2 Processus 49
PARTIE 2. RÉSULTATS **59**
A. DÉMARCHE PERSONNELLE 61
1. Démarche assistée par ordinateur *61*
1.1 Données 61
1.2 Logiciels 63
2. Processus *63*
2.1 Estimation de la faisabilité 63
2.2 Génération de l'interférogramme et coregistration 65
2.3 Extraction de la phase de terrain plat 65
2.4 Filtre et estimation du coefficient de cohérence 65
2.5 Déroulement de phase 67
2.6 Extraction des composantes orbitales 67
2.7 Ré-aplatissement 67
2.8 Transformation de l'information de phases en information de différences d'altitude (en mètres) 67

3. Résultats *69*
3.1 Elimination des couples 69
3.2 Les questions à se poser 71
B. A QUOI EST DUE L'ABSENCE DE RÉSULTAT SIGNIFICATIF? 71
1. Limites *71*
1.1 Les données 71
1.2 Le processus 71
2. Solutions techniques *73*
2.1 Processus 73
2.2 Données 75
2.3 Tester la technique sur d'autres images : Hô Chi Minh Ville 75
2.4 Tester la technique des réflecteurs permanents 75

PARTIE 3. INONDATIONS, UN RISQUE ACCRU PAR LA SUBSIDENCE ? 81

A. RISQUE D'INONDATION 83
1. L'aléa *83*
1.1 Cause d'inondation 83
1.2 Types d'inondation 87
2. Vulnérabilité *87*
2.1 Un grand nombre de facteurs accroît la vulnérabilité 87
2.2 Conséquences 89
3. Lutte contre les inondations *89*
3.1 Protections existantes 89
3.2 Solutions structurelles 91
3.3 Solutions non structurelles 93
3.4 Lacunes de gestion 95
B. INFLUENCE DE LA SUBSIDENCE 97
1. Sur les digues *97*
2. Sur les chenaux *97*
3. Sur les ouvrages d'art *97*

CONCLUSION 99

BIBLIOGRAPHIE 101

LISTE DES FIGURES 105

Partie 1. Présentation des concepts et de la méthodologie

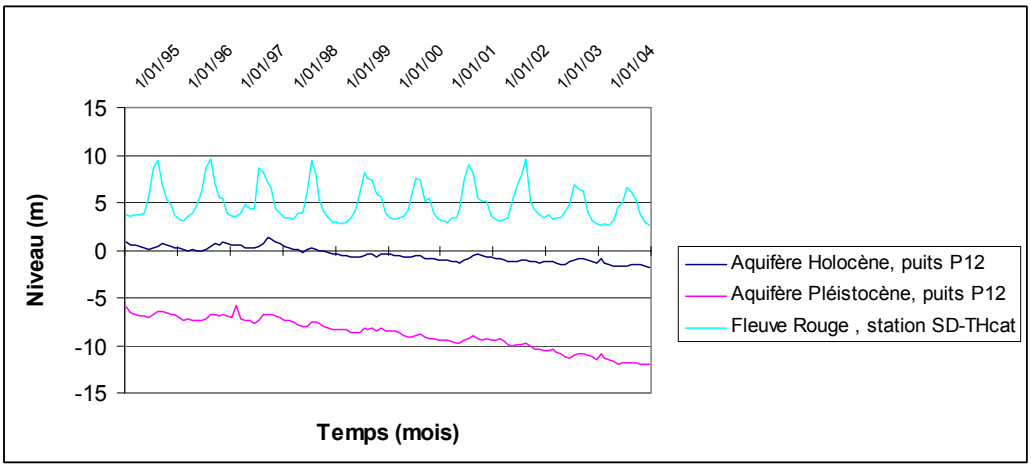


Figure 1.1 : Comparaison entre le niveau des aquifères et celui du Fleuve Rouge pour la période 1995-2004. Elle permet de mettre en évidence le lien existant entre les masses d'eau souterraine et le fleuve (Jusseret, 2006)

Figure 1.2 : Carte politique du Vietnam (CIA world Factbook, 2008)

A. Hanoi, capitale du Vietnam, une « sinking city »

Le Vietnam ne représente pas, dans l'opinion publique, l'archétype du pays où la ressource en eau constitue un enjeu majeur pour la croissance économique et sociale. Pourtant, le « dragon asiatique » commence à peine à s'extraire de trente années de guerre et de repli économique que Hanoi et Hô Chi Minh Ville (ex-Saigon) (HCMC) sont rapidement devenues des mégalopoles où protection de l'environnement ne rime pas avec développement. Cette constatation est frappante pour Hanoi où l'eau, directement extraite du sous-sol, est pompée de manière irraisonnée depuis le début des années 1900. En effet, depuis 1990, les niveaux d'eau souterraine (voir figure 1.1) sont en diminution constante et les taux de pompage de plus en plus importants, conséquence directe de la croissance démographique de la capitale (Jusseret, 2006).
La position de Hanoi au cœur du delta du Fleuve Rouge est stratégique. Mais cet endroit, qui a contribué à son développement économique et à son épanouissement culturel, implique également des vicissitudes. Notamment, environ 3 000 km de digues fluviales et 1 500 km de digues maritimes sans lesquelles le fleuve n'aurait pas sa position actuelle et Hanoi n'existerait pas comme ville et encore moins comme capitale[1].

1. Le Vietnam: selon Jusseret, 2006

1.1 Généralités

Le Vietnam (Viêt Nam, République Socialiste du Vietnam), pays d'Asie du Sud-Est bordé par la Chine (au N.), le Laos (au N.-O.), le Cambodge (au S.-O.) présente une importante bordure côtière (3 400 km) longeant la Mer de Chine méridionale (à l'E.) et le Golfe de Thaïlande (au S.). Le territoire est compris entre 9° et 23° de latitude N. et entre 102° et 110° de longitude E.[2]. Le pays est divisé en trois régions :

- le Tonkin (avec Hanoi et Haiphong),
- l'Annam (avec la longue plaine littorale du Fleuve Rouge et du Mékong et les villes de Huê et de Da Nang),
- la Cochinchine (avec Hô Chi Minh Ville) (voir figure 1.2).

Le pays compte une population de plus de 86 millions d'habitants avec un taux de croissance annuel de 1% en juillet 2008[3].

1.2 Cadre physique

1.2.1 Hydrographie

Deux fleuves majeurs possèdent leur embouchure dans le pays, le Fleuve Rouge et le Mékong, prenant tous deux naissance dans l'ouest de la Chine.

[1] http://academie.oieau.fr/academie/membres/phanoi.htm
[2] CIA World Factbook
[3] http://indexxmundi.com

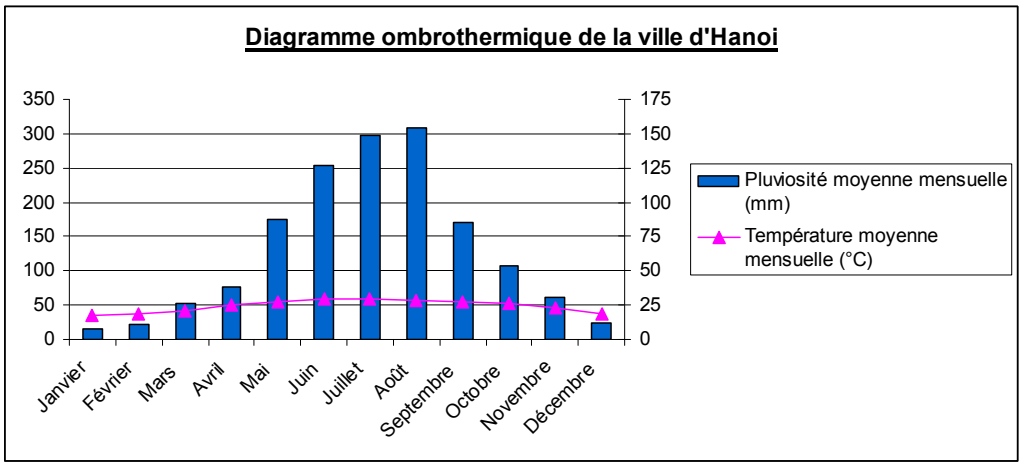


Figure 1.3 : Diagramme ombrothermique de la ville de Hanoi (données mensuelles de pluviométrie et de température des années 1995 à 2007)

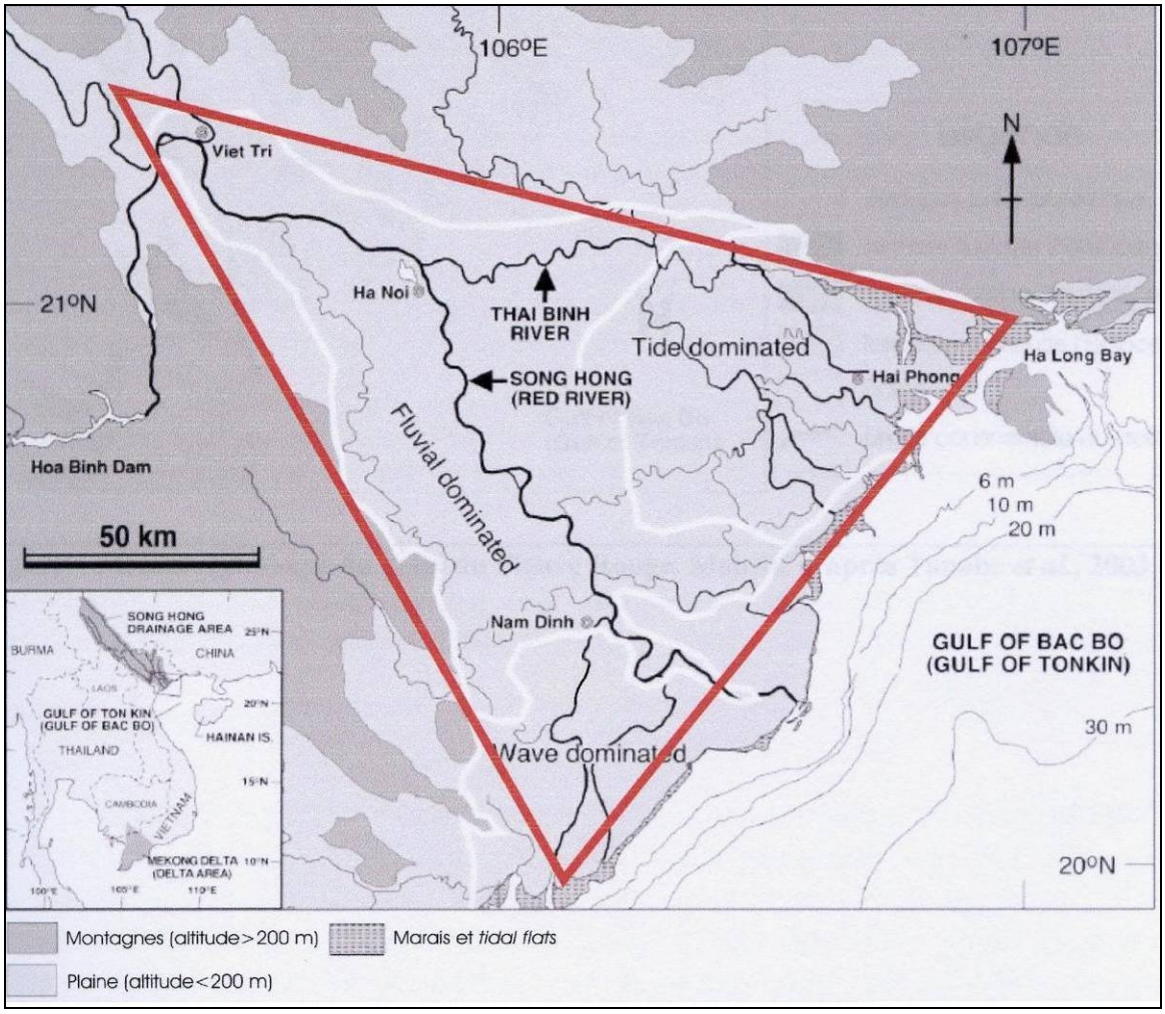


Figure 1.4 : Vue du delta (ou de la plaine deltaïque, selon les usages) de forme grossièrement triangulaire, qui prolonge la vallée du Fleuve Rouge (Jusseret, 2006)

1.2.2 Climat

Défini comme tropical de mousson, le climat est caractérisé par une saison sèche de novembre à avril et une saison humide de mai à octobre. La pluviosité moyenne mensuelle est de 257 mm durant les quatre mois principaux de mousson et totalise 1 600 mm/an. La température moyenne minimale est de 16,9°C et maximale de 30°C [4] (voir figure 1.3).

2. Le delta du Fleuve Rouge

2.1 Géomorphologie

Hanoi se localise dans une plaine de basse altitude (moins de 200 m), de forme grossièrement triangulaire, qui prolonge la vallée du Fleuve Rouge (voir figure 1.4) appelée « delta du Fleuve Rouge ». Même si le terme delta ne correspond pas à la définition classique de ces dépôts (puisque ceux-ci sont sensés être dérivés d'accumulations côtières d'embouchure, à la fois subaquatiques et subaériennes alors que le « sommet » du delta se situe à 150 km des côtes du Golfe), nous continuerons à nommer ci-après cette plaine, « delta », pour plus de simplicité.

Au cours de la période estivale de mousson, l'influence des marées dans la plaine deltaïque est extrêmement limitée en raison de l'importante charge d'eau douce apportée par le fleuve. Ceci contraste avec la saison sèche où ces mêmes effets peuvent se faire ressentir dans tous les grands distributaires majeurs, même jusqu'à Hanoi.

2.2 Géologie

Les sédiments quaternaires de la plaine deltaïque enveloppent de nombreuses collines composées de roches triasiques ou plus anciennes. La plaine est entourée de régions montagneuses constituées de terrains cristallins précambriens et de roches sédimentaires paléozoïques et mésozoïques. Ces terrains sont affectés par des failles dont l'orientation N.-O. – S.-E. correspond à celle du graben du Fleuve Rouge. Selon certains auteurs, l'activité tectonique cassante le long de la zone faillée se serait considérablement réduite il y a 5 millions d'années pour devenir quasi-nulle aujourd'hui.

[4] Moyennes calculées sur 13 ans, 1995 à 2007, d'après les données récoltées à l'Institut des Sciences Géologiques de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam à Hanoi.

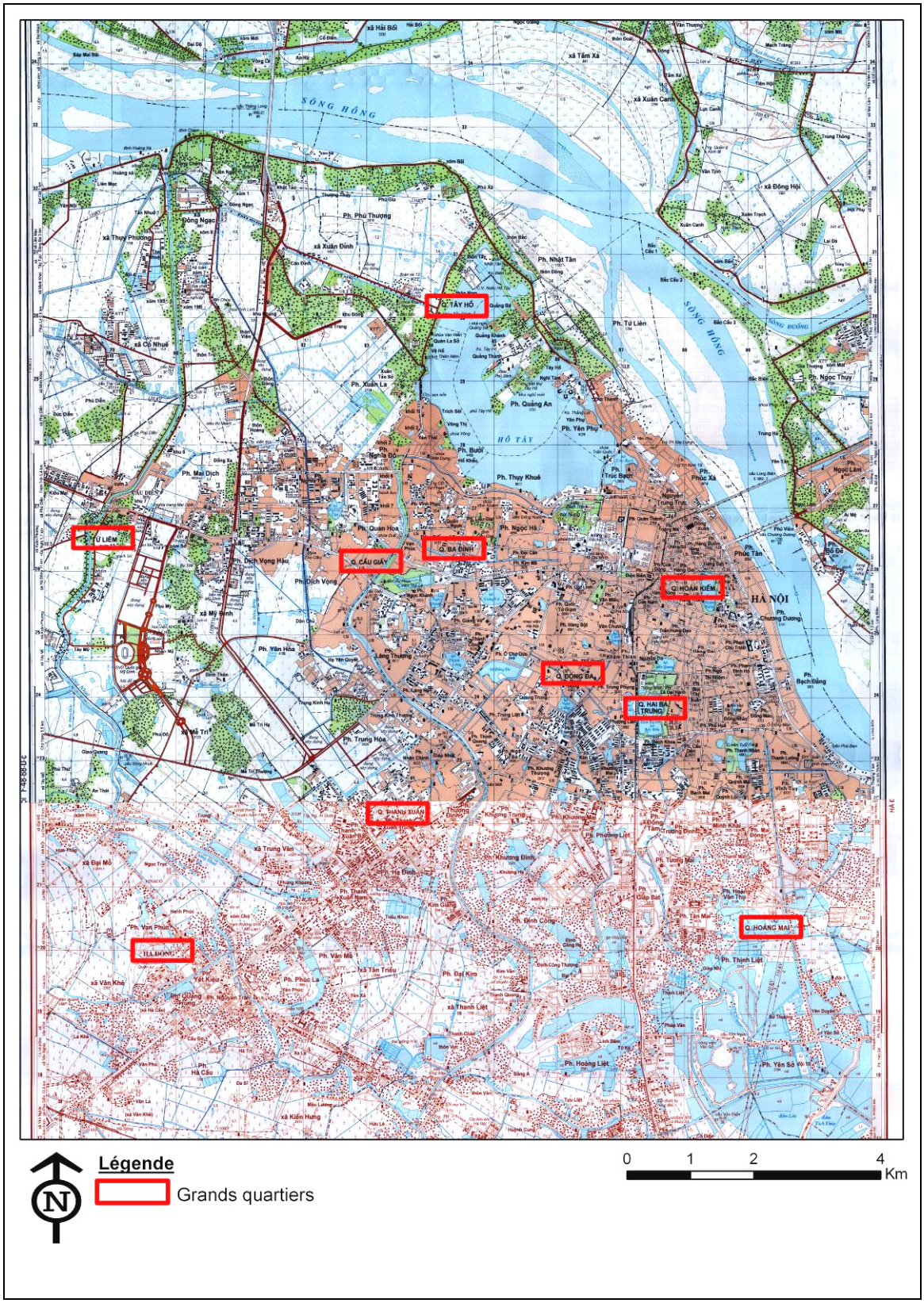


Figure 1.5 : Assemblage des cartes topographiques (6151 II et 6150 I) au 1/50.000 de 1980 de la ville de Hanoi, avec ses grands quartiers

3. Hanoi

3.1 Généralités

La capitale se situe dans la partie septentrionale du pays (de coordonnées 21°2' N et 105°51'E[5]). Sa population était de plus de 3,4 millions d'habitants[6] en 2007, ce qui représente 4% de la population totale du pays, avec un taux de croissance de 3,5%. La capitale occupe une superficie de 160 km² dont la limite orientale longe le Fleuve Rouge et dont la majeure partie se situe au sud des lacs de l'Ouest et de la Soie. Elle se situe à 100 km du golfe du Tonkin (voir figure 1.5).

3.2 Cadre physique

3.2.1 Géologie

La province entière de Hanoi est recouverte d'une importante couverture sédimentaire quaternaire (lacustre, alluviale et marine) qui peut atteindre plus de 100 m d'épaisseur (Jusseret, 2006). Ces dépôts, formés de graviers, sables (avec un coefficient haut de perméabilité (6.10^{-4} m/s) mais faible de compressibilité), silts et argiles (avec des coefficients faibles de perméabilité (4.10^{-9} m/s) et fort de compressibilité), plus ou moins riches en matières organiques (tourbe), reposent en discordance sur un socle tertiaire (Trinh et Fredlund, 2000). Ce dernier serait composé de conglomérats, grès et schistes.

3.2.2 Hydrographie

- Fleuve Rouge : Il porte ce nom car ses eaux sont d'une turbidité rougeâtre du fait qu'il transporte 80 millions de m³ d'alluvions par an (Nguyen, 2006). Le débit moyen du cours d'eau à Long Bien (sous le vieux pont) est d'environ 4 180 m³/s, pour totaliser 130 km³ par an. Il existe de fortes variations saisonnières. En effet, le climat est de type saisonnier humide-sec (tropical de mousson), ce qui implique un débit moyen de l'ordre de 11 505 m³/s en juillet-août et de 1 800 m³/s entre janvier et mai[7] (voir figure 1.6).

Un distributaire se distingue du cours principal, le Thai Binh (ou Song Duong), ne représentant que 20% du débit total du fleuve.

[5] CIA World Factbook, mai 2008
[6] http://english.vietnamnet.vn
[7] Moyennes calculées sur 13 ans, 1995 à 2007, d'après les données récoltées à l'Institut des Sciences Géologiques de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam à Hanoi.

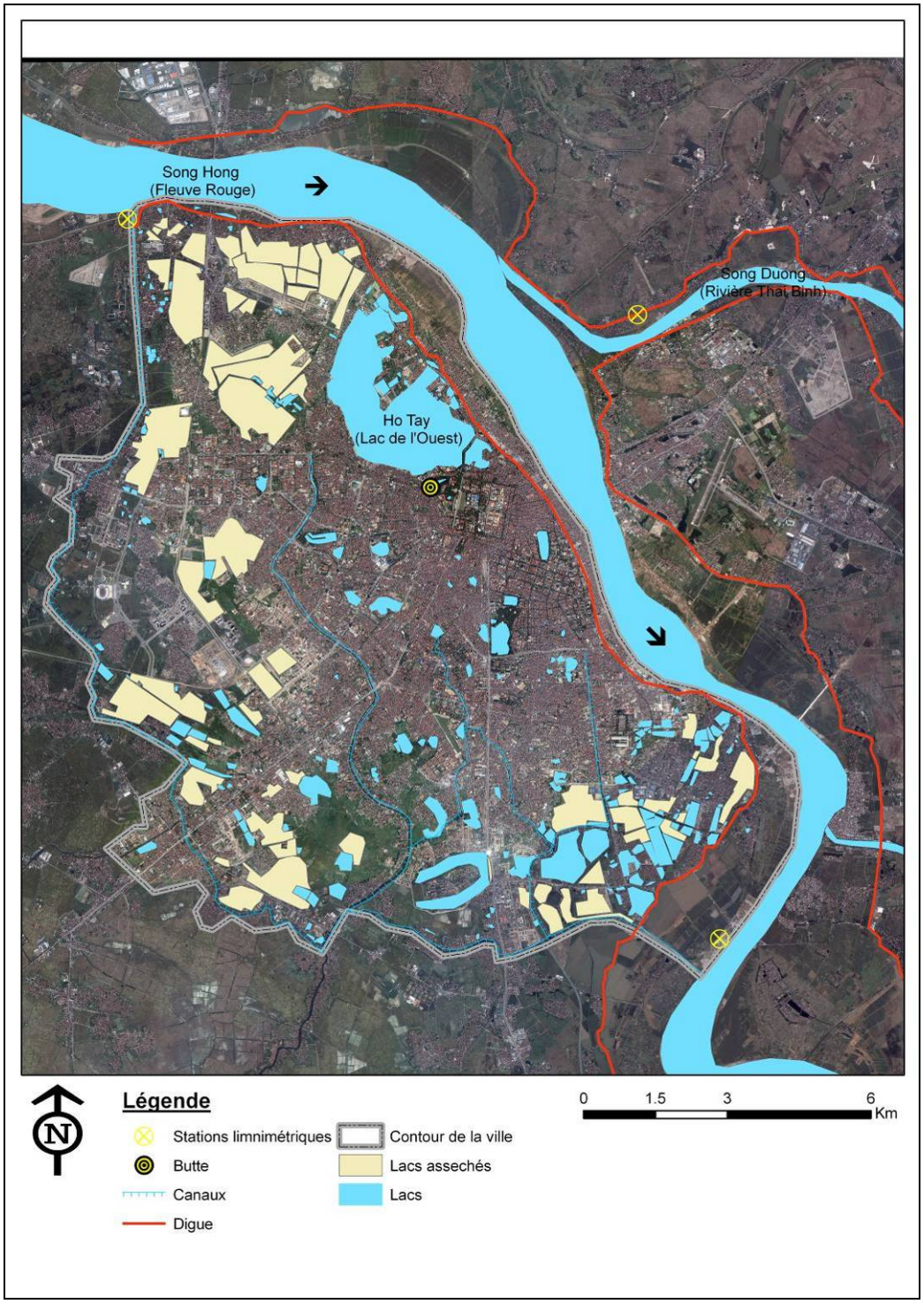


Figure 1.6 : Carte du réseau hydrographique (lacs, Fleuve Rouge, canaux) avec les stations limnimétriques et les digues. Fond de carte : Google Earth, 2003.

Aquifère:	Supérieur	Inférieur
Epaisseur (m)		
Partie supérieure	10	2 à 10
Partie inférieure	9,2 au nord / 13,3 au sud	10 à 35
Date	Holocène	Pléistocène

Tableau 1.1 : Caractéristiques des aquifères (Nguyen, 2002)

- Aquifère – Aquitard : Les sédiments quaternaires précédemment renseignés renferment les aquifères dont Hanoi tire son eau de distribution publique. Les sédiments grossiers (sables et graviers) se rencontrent dans les structures en chenaux et constituent les principaux aquifères (suite à des pompages effectués dans le cadre de son mémoire, des essais effectués par Jusseret en 2006 ont conclu à une conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m/s, valeur en adéquation avec des dépôts sablo-graveleux) et les argiles et silts de ride alluviale forment les unités peu perméables (aquicludes). Deux aquifères coexistent (voir tableau 1.1) et sont presqu'isolés par une couche silto-argileuse peu perméable. Les niveaux d'eau de l'aquifère holocène sont généralement supérieurs à ceux de l'aquifère pléistocène, ce qui signifie que l'infiltration des eaux phréatiques à travers la couche silto-argileuse de l'Holocène basal est susceptible de participer à la recharge de l'aquifère pléistocène (qui se trouve être le plus sollicité par les pompages). Le cas se trouve inversé lorsqu'on se situe dans des zones éloignées des pompages (Jusseret, 2006).

Le mode de recharge principal des aquifères est peu connu. Deux hypothèses sont entendues : les infiltrations liées aux précipitations (ou via lacs et rivières) ou au Fleuve Rouge. La quasi totalité des eaux de ruissellement à l'intérieur de la zone est collectée par le réseau d'égouttage et acheminée vers le Song Nhuê qui se jette dans le Fleuve Rouge au N.-O. du centre urbain. Donc, même si le ruissellement semble important au vu du haut degré d'urbanisation, seule une petite partie peut s'infiltrer et, par l'intermédiaire des égouts, une autre peut participer à la recharge (idée venant de Dassargues et Zhang, 1992).

Les recharges s'opèrent d'avril à septembre car c'est durant cette période que l'évaporation est inférieure aux précipitations.

- Rapport entre le fleuve et les stockages (voir figure 1.1) : Le niveau du Fleuve Rouge est supérieur à celui des aquifères, tant au cours de la saison sèche que de la saison humide. Les écoulements souterrains sont de ce fait orientés du fleuve vers les masses d'eau quelque soit la période de l'année.

3.2.3 Géomorphologie

Les processus sédimentaires actifs sont ceux associés aux cours d'eau. Nous sommes dans un environnement deltaïque typique avec une élévation moyenne de 4 m [8] au-dessus du niveau moyen de la mer, même si le plus haut point de la ville se trouve à 17,4 m (voir figure 1.6) sur une petite butte isolée au sud du lac de l'ouest. Plusieurs petites dépressions en forme de cuvettes ou de lacs peu profonds sont observées dans et autour de la zone, ce qui rappelle les diverses divagations anciennes du fleuve (Chatterjee *et al.*, 2006).

[8] CIA World Factbook, mai 2008

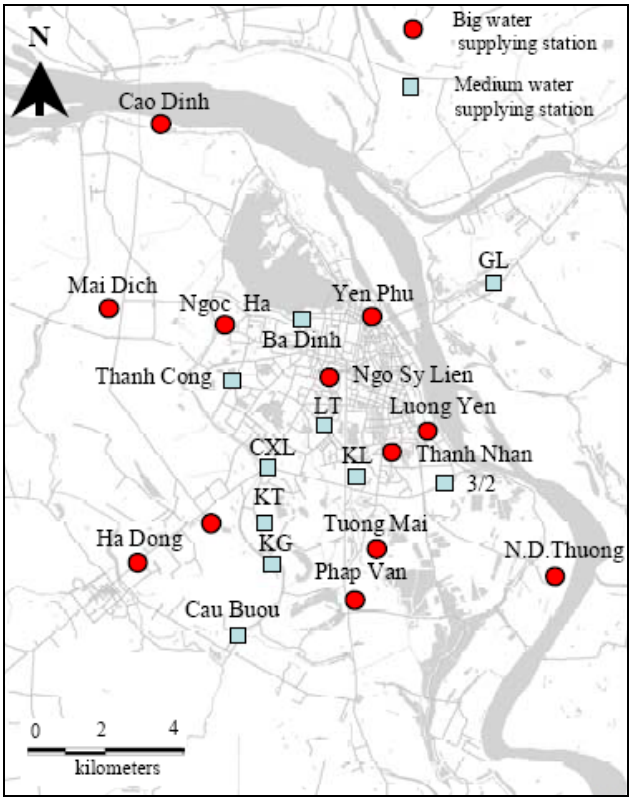


Figure 1.7 : Carte situant les principaux lieux d'extraction des eaux souterraines et les stations de forages (Tran *et al.*, 2007)

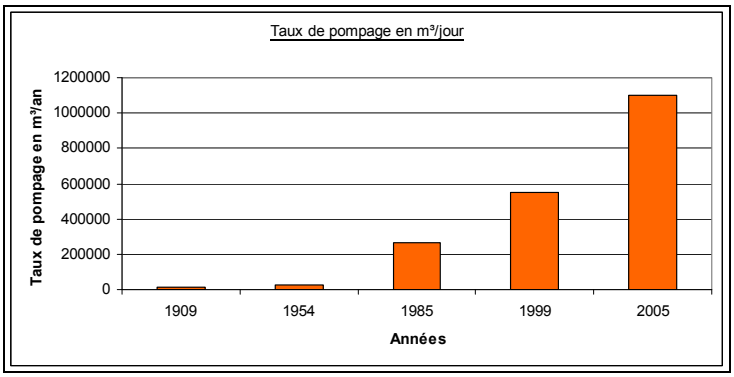


Figure 1.8 : Graphique indiquant les taux d'extraction et présenté dans l'article de Tran *et al.*, 2007.

B. Phénomène de subsidence

1. Généralités

L'eau souterraine est pompée des sables et graviers, pour les besoins domestiques et industriels, depuis une dizaine de grands puits et un grand nombre de petites stations atteignant un total de 170 000 (même si on dénombre plus de 20 000 puits illégaux[9]) (voir figure 1.7). Hanoi est uniquement alimentée à partir des eaux souterraines d'aquifères immédiatement sous-jacents à la ville et à ses banlieues.

Suite à l'ouverture politique du pays en 1985, l'économie vietnamienne a commencé à croître rapidement, comme sa population et ses développements technologiques. Ceux-ci ont produit une demande supplémentaire en eau potable et donc, ont contraint les taux de pompage à s'accélérer (Tran *et al.*, 2007) (Trinh et Fredlund, 2000)(voir figure 1.8). Depuis, entre les années 1999 et 2003, le gouvernement finlandais a assisté la Compagnie d'Alimentation en Eau de Hanoi (H.W.B.Co pour Hanoi Water Business Company) pour la rénovation et l'augmentation de la capacité de ses forages et de ses stations de traitement dans le cadre du projet H.W.S.P. (Hanoi Water Supply and Environment Project Stage 1A)[10]. Certaines stations datent, en effet, de 1909, 1930 et 1939[11] !

Le montant total annuel des eaux prélevées, distribuées entre les différentes zones, cause l'augmentation de la contrainte effective dans les sédiments non consolidés saturés provoquant la compaction des couches compressibles (Dassargues et Zhang, 1992). Il en résulte une subsidence significative qui a causé des dommages aux bâtiments, aux routes, au réseau d'assainissement, quand il existe, et aux oléoducs. Elle a aussi changé les zones atteintes par les inondations (Wang *et al.,* SD).

2. Explication théorique du phénomène

La contrainte totale dans un milieu poreux saturé est égale à la somme de la contrainte grain-à-grain (ou contrainte effective) et de la pression d'eau. La baisse du niveau piézométrique crée une chute de la pression d'eau dans le milieu poreux saturé provoquant une augmentation de la contrainte effective et une diminution de la contrainte totale. Si les sédiments sont, d'une manière ou d'une autre, compressibles, la diminution de la pression d'eau cause de la compaction et donc le tassement de ces mêmes sédiments (Dassargues et Zhang, 1992).

[9] http://vietnamnews.vnagency.com.vn, mai 2008
[10] http://www.hcg.helsinki.fi
[11] http://academie.oieau.fr/academie/membres/phanoi.htm

La couche argileuse rencontrée à la base de l'Holocène serait susceptible de subir de tels mouvements de consolidation, en relation avec la diminution de pression interstitielle engendrée par l'augmentation des débits pompés. Cette baisse de pression conduit, au sein d'un tel matériau compressible, à la réorganisation des feuillets argileux. Ce processus s'accompagne d'une diminution de l'espace intergranulaire et de l'emmagasinement. Des mouvements subsidents en surface peuvent finalement constituer la conséquence de ces réorganisations à l'échelle microscopique. Ce même processus peut évidemment affecter la couche silto-argileuse discontinue enregistrée dans les dépôts pléistocènes (Jusseret, 2006).
Evidemment, l'urbanisation croissante, avec la construction « toujours plus haute » d'immeubles, contribue de manière non négligeable au phénomène (Damoah-Afari et Ding, 2005).

D'autres causes peuvent engendrer un phénomène de subsidence :

- Naturelles : La compaction normale des sédiments fluvio-deltaïques (mais elle s'applique de manière régionale et uniforme), l'activité volcanique (pas ici), la dissolution de roches solubles (Kim *et al.*, 2007) ou le glissement de sédiments le long de failles réactivées (Chatterjee *et al.,* 2006).
- Anthropiques : L'activité minière ou la construction d'un métro souterrain.

3. Liens de la localisation et des taux de la subsidence

3.1 Avec la localisation des stations de pompage

La subsidence des terrains est directement liée à la proximité et à la concentration des lieux de pompage d'eau souterraine et à leurs taux d'extraction. Mais la corrélation spatiale entre les zones de subsidence et les stations de pompage ne peut être établie de manière approfondie car la structure tridimensionnelle des sédiments non consolidés n'est pas suffisante, à elle seule, pour simuler le comportement hydrogéologique des eaux souterraines (Tran *et al.,* 2007).

3.2 Avec les propriétés géophysiques des sols

Les tassements vont être irréguliers à cause de l'hétérogénéité des conditions des sols et au fait que le coefficient de perméabilité varie aussi bien horizontalement que verticalement (Trinh et Fredlund, 2000).

3.3 Avec le cycle saisonnier

En période humide, l'eau humecte et infiltre le sol. Elle recharge les nappes aquifères et induit une augmentation de la pression de pores, la contrainte effective diminue et donc le phénomène de subsidence est freiné.

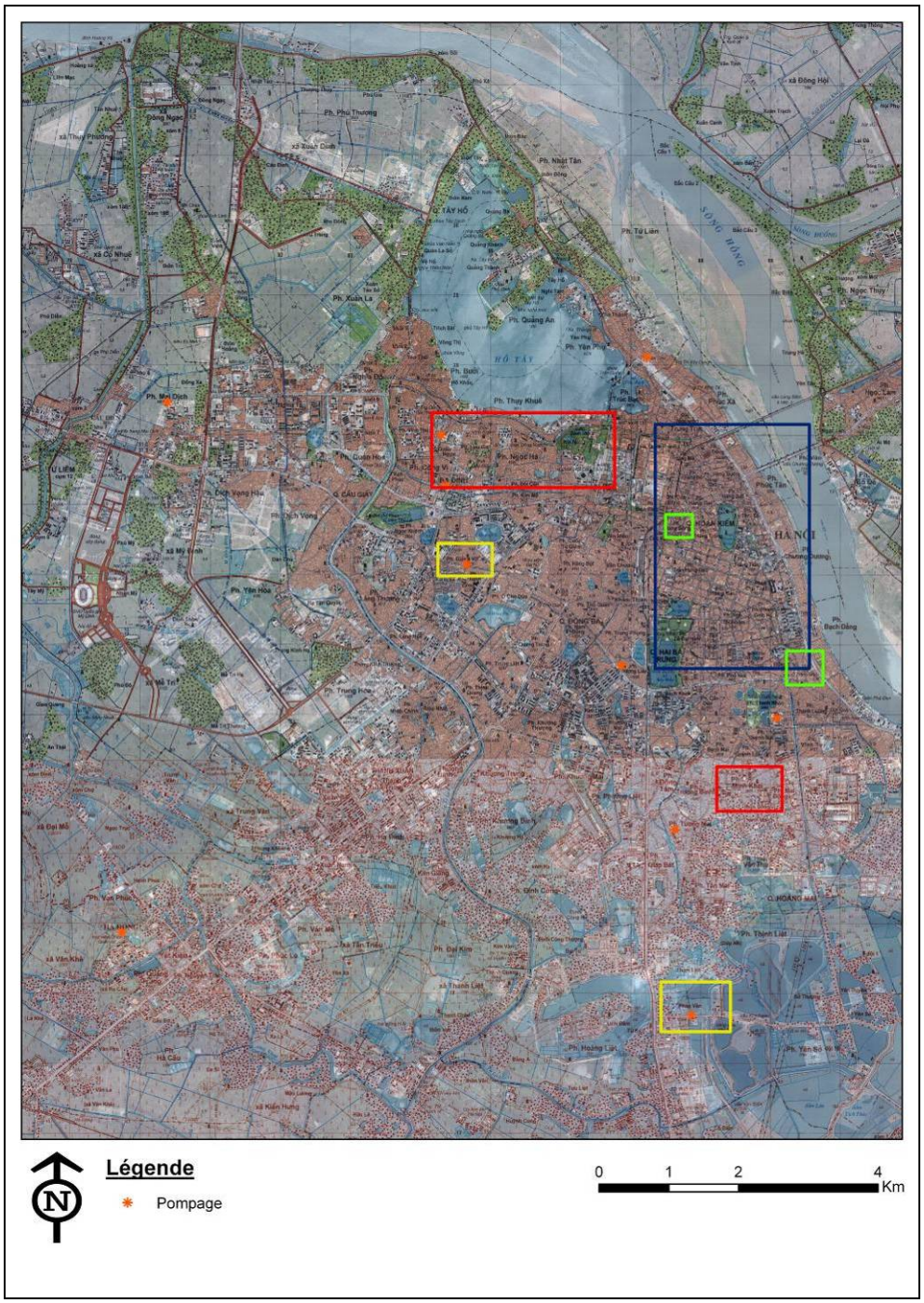


Figure 1.9 : Carte présentant les localisations de subsidence mentionnées dans les articles ci-contre cités et quelques lieux de pompage connus

Fond de plan : assemblage de la carte topographique 1/25.000, 2003 et de l'image Google Earth, 2003.

Légende :
- Cadre rouge : Localisation de la subsidence selon Tran *et al*., 2007
- Cadre bleu : Localisation de la subsidence selon Trinh et Fredlund, 2000
- Cadre jaune : Localisation de la subsidence selon Deguchi, 2005
- Cadre vert : Localisation de la subsidence selon Raucoules et Carnec, 1999

3.4 Avec le contexte tectonique de delta

L'influence de la tectonique **due à la position de la ville dans un delta** est nulle car Hanoi se trouve au centre d'une plaque continentale stable et loin des bordures de plaques. Néanmoins, Hanoi se localise sur la faille du Fleuve Rouge, ainsi, elle n'est pas à l'abri d'un séisme pouvait atteindre 6,5 de magnitude sur l'échelle ouverte de Richter (Nguyen Hong Phuong, http://lecourrier.vnagency.com.vn) (en mai 2008, suite à un séisme ayant eu lieu dans la province chinoise du Sichuan, à 1 000 km de la ville, des secousses « répliques » ont été ressenties).

4. Autres études

- Tran V.A., Masumoto S., Raghavan V., Shiono K., 2007, "Spatial distribution of subsidence in Hanoi detected by JERS-1 SAR Interferometry", Japon, Geological Data processing, volume 18, Issue 1, pages 3-13:

Distribution spatiale de la subsidence à Hanoi par interférométrie radar détectée par **JERS** 1, bande L et utilisation du logiciel GAMMA. La longueur d'ondes de 23,513 cm est moins influencée par la végétation et la vapeur d'eau dans l'atmosphère que la bande C d'ERS-1/2. Utilisation d'images de 1995 à 1998. Ils utilisent deux paires d'images avec la même image maîtresse et ils utilisent le premier couple comme référence topographique pour extraire la phase, c'est donc une technique dit « tri-pass DInSAR » qui a été utilisée ici (Résultats : figure 1.9).

- Trinh T.M., Fredlund D.G., 2000, "Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam", Canada, Canadian geotechnical journal, volume 37, Issue 3, pages 621-637:

Étude du tassement de la ville en relation avec les flux des eaux souterraines. Une modélisation de la subsidence en fonction des données de géologie, d'hydrologie, de pédologie et des observations de terrain a été effectuée. Le modèle utilisé (Modflow) sur la zone d'étude (39 x 40 km) contient des cellules (de 125 m sur 125 m) représentant le ou les puits (et leur taux d'extraction) situés à l'intérieur de celles-ci. Les études préliminaires ont porté sur l'information générale liée aux conditions du site de la ville et sur les investigations du sol conduites sur quelques champs de puits. L'estimation de la subsidence dans la zone de Hanoi est reliée à l'étude des flux d'eau souterrains (infiltration, analyse contrainte-déformation). Les résultats sont exprimés sur la figure 1.9).

- Raucoules D., Carnec C., 1999, "DEM derivation and subsidence detection on Hanoi from ERS SAR interferometry", France, 2nd International Workshop on ERS SAR Interferometry. Fringe'99, 6 pages

Détection de la subsidence et extraction d'un MNT de la ville de Hanoi par interférométrie. Utilisation de six images ERS-1/2 (dont trois en ma possession). Pour le MNT, ne possédant aucun couple avec une ligne de base inférieure à 90 m et moins de 35 jours de séparation entre les acquisitions, la décorrélation est trop importante engendrant un bruitage manifeste de la scène et une impossibilité de placer des points de contrôle. Utiliser un filtre reviendrait à négliger une part importante de la phase. Une solution alternative fut trouvée avec la coregistration (voir C.2.2.1 ci-dessous) des images d'amplitude sur une image SPOT et l'extraction des fréquences responsables du bruit. Pour la subsidence, les interférogrammes sont également affectés de tavelures, ce qui réduit fortement leur précision même si des résultats (voir figure 1.9) sont visibles.

Ξ *Hypothèse* : La ligne de visée étant oblique, l'opérateur se voit contraint d'émettre l'hypothèse que la déformation est strictement verticale (et donc inclinée d'un angle de 23° par rapport à la ligne de visée) et linéaire uniforme durant la période d'observation.

La subsidence de la ville de Hanoi est un risque naturel induit

C. Radar et interférométrie radar :

L'interférométrie radar est une technique alternative aux méthodes conventionnelles géodético-spatiales de relevés de terrain pour obtenir des informations sur la topographie et sur les mouvements verticaux, spécialement des zones urbanisées (Raucoules et Carnec, 1999). Il est possible aujourd'hui de détecter les changements de la surface de la Terre, comme **la subsidence**, sur des périodes allant d'un jour à plusieurs années avec une échelle (globale), une exactitude (de l'ordre du millimètre) et une fiabilité (jour et nuit et par tout type de temps) étonnantes. Cette nouvelle méthode va au-delà des obstacles liés aux techniques traditionnelles (relevés GPS et campagnes de nivellement), celles-ci étant confinées à étudier les changements dans des zones limitées accessibles, requérant un grand nombre d'observations individuelles et étant généralement coûteuses à acquérir (Wang *et al.*, SD).

En intégrant ces images dans un SIG, avec une carte géologique par exemple, on peut établir des relations entre la géologie et les mouvements de sol, et donc d'identifier au préalable des zones non détectées et non suivies sans enquête de terrain. Cela est intéressant pour inciter et les décisionnaires gouvernementaux et les pouvoirs politiques à prendre part à une mitigation pointue des risques (Thomas et Haynes, 2006).

Le suivi des déformations par interférométrie radar a déjà séduit plusieurs auteurs, aussi bien dans le suivi des dunes, de glissement de terrain, des anomalies volcaniques ou de la subsidence que dans la compilation de MNT de grande précision. Quelques exemples dans la littérature prouvent cet engouement :

- Volcanisme: Wadge G., Mattioli G.S.,. Herd R.A, "*Ground deformation at Soufriere Hills Volcano, Montserrat during 1998-2000 measured by radar interferometry and GPS*", USA, Royaume Uni, Hawaii, 2006, Journal of Volcanology and Geothermal Research, volume 152, pages 157-173
- Dunes: BODART C., 2007. Apport de l'interférométrie radar dans l'étude des mouvements de sable (S.-E. du Niger), Mémoire de DEA - Université de Liège
- Subsidence: Chatterjee R.S., Fruneau B., Rudant J.P., Roy P.S., Frison P.L., Lakhera R.C., Dadhwal V.K., Saha R., "*Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1900s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry technique*", France, Inde, 2006, Remote Sensing of Environment, volume 102, pages 176-185

1. <u>Principes d'acquisition</u>

Un émetteur envoie des ondes radio, qui sont réfléchies par la cible et détectées par un récepteur, souvent situé au même endroit que l'émetteur. La position est estimée grâce au temps de retour du signal et la vitesse est mesurée à partir du changement de fréquence du signal par effet Doppler.

1.1 Plate forme spatioportée

1.1.1 Capteur

Le RSO, radar à synthèse d'ouverture (ou SAR en anglais), est un système d'imagerie par rayonnements micro-ondes embarqué sur des plates-formes mouvantes telles que des satellites (Raucoules *et al.,* 2007). C'est un radar imageur qui effectue un traitement des données reçues afin d'améliorer la résolution azimutale. En effet, l'antenne du radar a une ouverture azimutale assez grande (plusieurs degrés) dans la direction du mouvement et elle peut s'étendre latéralement de l'horizon à la verticale ce qui donne une résolution assez faible. Le traitement effectué permet d'affiner l'ouverture de l'antenne, on parle donc de synthèse d'ouverture. D'où le nom de ce type de système[12].Dans notre cas, le système d'acquisition est « STRIPMAP », l'antenne est fixe.
Cette technique va plus loin que la simple observation terrestre optique basique (EO) :

- D'une part, le système est « actif »[13], l'acquisition d'images peut ainsi s'effectuer de jour comme de nuit,
- D'autre part, il peut opérer sur des bandes C, L ou X, avec des fréquences respectives de 5,3 GHz, 1,2 GHz, 10 GHz (et donc une longueur d'onde de 5,6 cm, 24 cm, 3 cm), les changements de surface peuvent être détectés à une échelle centimétrique (Chang *et al.*, 2004) et à travers une couverture nuageuse.

1.1.2 Description de la plate-forme

- ERS (European Remote Sensing) 1 et 2 possède un capteur opérant sur la bande C focalisée autour d'une fréquence porteuse fixe Doppler (Derauw, 1999). ERS-1 fut lancé en 1991 et est resté opérationnel jusqu'en 2000 même s'il était en « stand-by » depuis 1995 ; ERS-2 fut mis en orbite en 1995, ce qui permit un fonctionnement en « tandem » d'août 1995 à juin 1996. L'angle d'incidence, de 23°, et la polarisation sont fixes. Les deux satellites ont une orbite quasi polaire, sont en phase à 24 h d'intervalle (ERS-2 suit ERS-1) et ont un cycle orbital de 35 jours[14]. Leur orbite est soit descendante (N→S) ou ascendante (S→N). Les deux trajectoires peuvent être considérées comme parallèles puisqu'il s'agit, en fait, de la même orbite à des moments différents.

[12] http://fr.wikipedia.org
[13]Actif : c'est-à-dire que le satellite capte le signal qu'il a lui même envoyé
[14] Cycle orbital de 35 jours : c'est à dire que le satellite revient à la même position tous les 35 jours

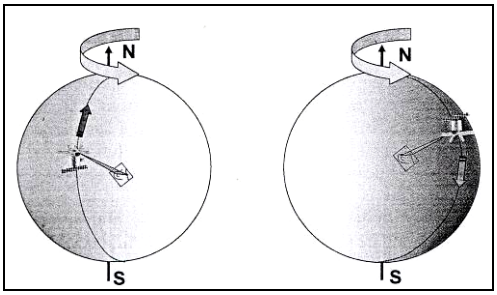


Figure 1.10 : Schéma d'une orbite ascendante (à gauche) et descendante (à droite) (Ferretti *et al.*, 2007)

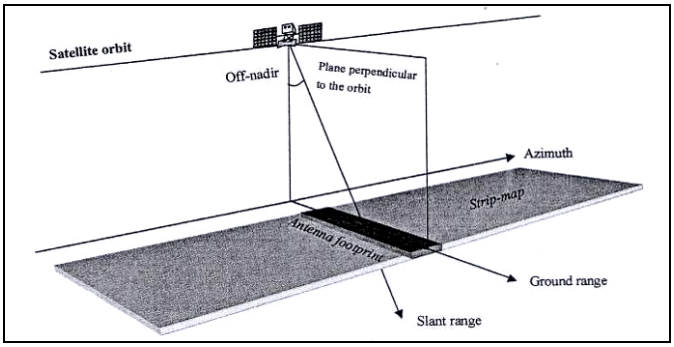


Figure 1.11 : Schéma d'acquisition d'une image radar par un satellite ERS (Ferretti *et al.*, 2007)

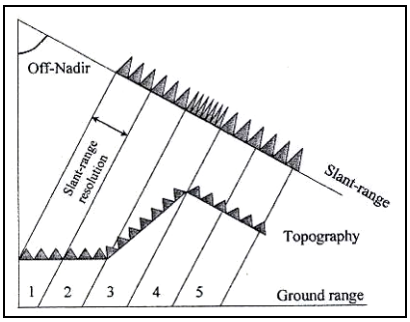


Figure 1.12 : Effets de la topographie sur la résolution des cellules en portée au sol. Les cellules contiennent toutes trois triangles, donc possèdent la même résolution en portée selon la ligne de visée. Les deux premières cellules représentent un terrain plat, la suivante une pente positive avec plus de trois triangles et les deux dernières une pente négative avec moins de trois triangles par cellule. (Ferretti *et al.*, 2007)

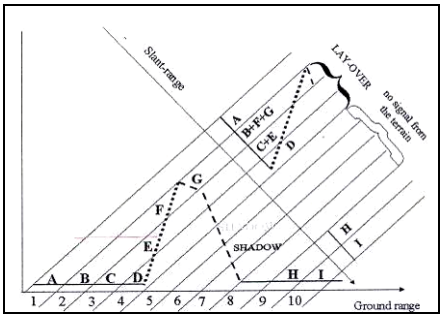


Figure 1.13 : Effets de la perspective sur la qualité de cellules en portée au sol. La pente DEFG est telle qu'elle est imagée dans des cellules qui ont déjà été imagées précédemment puisqu'elles appartiennent à d'autres parties de terrains (2 et 3), elles sont donc recouvertes (effet de « layover »). Cette pente « extrême » engendre un effet d'ombre de l'autre côté, tel que le point G ne peut être imagé (effet d'ombre). (Ferretti *et al.*, 2007)

L'antenne ERS pointe toujours du coté droit, ce qui induit qu'en phase ascendante, la zone est observée depuis l'O. (image penchée vers la gauche) et en phase descendante, la zone est observée depuis l'E. (image penchée vers la droite) (voir figure 1.10). L'antenne est orientée latéralement plutôt que verticalement pour une raison triviale : le radar ne distingue les cibles que par leur distance. A la verticale du lieu, les distances sont sensiblement les mêmes donc les points ne sont pas discernables. De même, deux points situés de part et d'autre de la verticale du radar sont équidistants, donc confondus[15].

- ENVISAT fut lancé en 2002 et procure des images ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) dont la fréquence centrale est de 5,331 GHz. L'orbite est quasi polaire (98°54') héliosynchrone et est localisée à une altitude de 800 km.

1.1.3 Schéma d'acquisition (voir figure 1.11)

Les éléments présents sur la figure sont :
- La « slant range » ou portée selon la ligne de visée,
- La « ground range » ou portée au sol,
- L'azimut,
- La ligne de visée : la direction depuis le capteur vers les cibles radar au sol est nommée « line of sight » (LOS) ou « slant range direction »
- L' « off nadir » : inclinaison de l'antenne de 21° par rapport à son nadir,
- L'angle d'incidence : inclinaison de la portée selon la ligne de visée par rapport au sol, est de 23°,
- L'empreinte au sol est de 5 km sur 100 km → pixel rectangulaire.

Ξ *Hypothèse* : Pour la simplicité, on considère que la Terre est plate et que l'off nadir est égal à l'angle d'incidence, donc est de 23°

1.1.4 Effets

- Dus à la topographie locale et à l'angle de prise de vue : Le « foreshortening » ou déport. La résolution des pixels en portée au sol se voit modifiée. Elle est agrandie si la pente est négative et diminuée si la pente est positive (voir figure 1.12).
- Dus à la perspective (voir figure 1.13) : L'effet de « layover » ou recouvrement est dû à une pente qui vaut l'angle du nadir du radar. La cellule résultante est très grande, recouvre les autres et engendre une perte de détails par superposition et un désordre dans les acquisitions. L'effet d'ombre est dû à une pente supérieure à l'angle du nadir du radar, ce qui cause une absence de signal et donc des cellules vides.

[15] http://www.irit.fr

1.1.5 Azimut

L'azimut est défini comme étant la direction longitudinale, parallèle à la trajectoire. Il est fonction de la projection orthogonale de la distance antenne-cible et de l'angle d'ouverture. Dans une image, les différentes lignes correspondent aux différentes positions en azimut et un pixel vaut 4 m sous ERS (Bodart, 2007).

1.1.6 Portée

(« Range ») La portée est la direction transversale, perpendiculaire à la trajectoire. Elle est fonction de la durée d'impulsion. Dans une image, les différentes colonnes correspondent aux différentes positions en portée en ligne de visée. La portée le long de la ligne de visée est appelée « slant range » (1 pixel = 7.9 m) et celle au sol « ground range » (1 pixel = 20 m).

1.2 Image « simple » en sortie

1.2.1 Pixel

Un pixel correspond à une information d'**amplitude**, liée à la réflectivité et à la géométrie de la zone observée et une information de **phase** contenant un terme proportionnel au chemin optique parcouru par l'onde radar entre le senseur et le point observé ainsi qu'un terme dû à la rétrodiffusion (Derauw, 1999). La valeur du signal contenue dans le pixel est donc un nombre complexe, avec une partie imaginaire : la phase et une partie réelle d'amplitude du signal rétrodiffusé par l'ensemble des cibles situées à l'intérieur de ce pixel projeté au sol (Ferretti *et al.,* 2007). L'équation de la valeur d'un pixel, selon Derauw (1999) :

$$\boxed{P_i(x,z_i) = |P_i(x,z_i)| e^{-jk_{z_0} z_i} e^{j\psi_i(x,zi_i)}} \quad \text{Equation 1.1}$$

- $P_i(x,z_i)$ est la valeur complexe du point P dans l'image,
- $|P_i(x,z_i)|$ est l'amplitude du signal rétrodiffusé dans l'image i,
- $k_{z_0} z_i$ est la phase de transport du signal c'est-à-dire la phase relative au chemin parcouru où $k_{z_0} = 2\frac{2\pi}{\lambda}$ est le nombre d'onde du signal (le facteur 2 tient compte du trajet aller-retour, puisque la radiation transmise depuis le radar doit transiter jusqu'au réflecteur sur le sol puis doit revenir vers le radar pour former l'image),

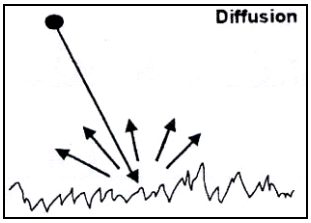


Figure 1.14 : Phénomène de diffusion : les rayons envoyés par la source ne sont, en majorité, pas renvoyés vers elle, ce qui cause une perte du signal

- Ψ_i est la phase de reconstruction. Ce terme n'est, a priori, pas nul. Puisque les acquisitions ne sont ni simultanées, ni du même senseur (et donc avec un angle d'incidence différent), cela induira une décorrélation temporelle et géométrique (spatiale).

Ξ *Hypothèse* : On considère que les conditions d'acquisition sont identiques ainsi la phase dans l'interférogramme dépendra de la différence de chemin optique parcouru lors des deux acquisitions uniquement (Derauw, 1999).

1.2.2 Image SLC

L'ensemble des signaux enregistrés génère une matrice complexe à deux dimensions, (représentées en termes d'amplitude et de phase) s'appelant : image SAR, portant une extension SLC (Single Look Complex) et ayant une dimension de 100 km sur 100 km (Raucoules *et al.*, 2007).
Chaque image contient des informations à propos de la position du sol **au moment où** les données ont été acquises par le satellite (Thomas et Haynes, 2006). Les coordonnées en x représentent la portée au sol et en y, l'azimut.

▲ Communément, l'image radar est l'image d'amplitude (racine carrée de l'intensité). Etant donné que l'image SLC possède des pixels rectangulaires, (Bodart, 2007), les images d'amplitude ont été moyennées sur 1 pixel dans la direction de la portée et sur 6 pixels dans la direction de l'azimut. En terrain plat, on obtient donc des pixels, approximativement carrés, de 20 x 20 mètres.

1.2.3 Amplitude

Le signal retour contient donc la mesure de l'amplitude de la radiation réfléchie (« backscattered radiation ») vers le radar par les objets (réflecteurs). Elle est proportionnelle au coefficient de rétrodiffusion et donc dépend de la rugosité (aires urbaines et rocheuses, beaucoup de réflecteurs : amplitude forte >< aires planes et spéculaires (lac, piste d'avion), aucun objet réfléchissant : amplitude faible car tout le signal est diffusé (voir figure 1.14)) et de la composition chimique. (Ferretti *et al.*, 2007). Lorsqu'un pixel est rendu « brillant » cela signifie qu'il y a eu une grande réflexion, s'il est rendu « noir », une faible réflexion.

1.2.4 Phase

La radiation transmise depuis le radar doit atteindre le réflecteur sur le sol et puis doit revenir vers le radar pour former une image (trajet 2R). Les réflecteurs à différentes distances du radar introduisent différents délais entre transmission et réception du signal. Le délai entre l'émission et la transmission de l'onde dépend donc de la distance entre l'objet et le satellite.

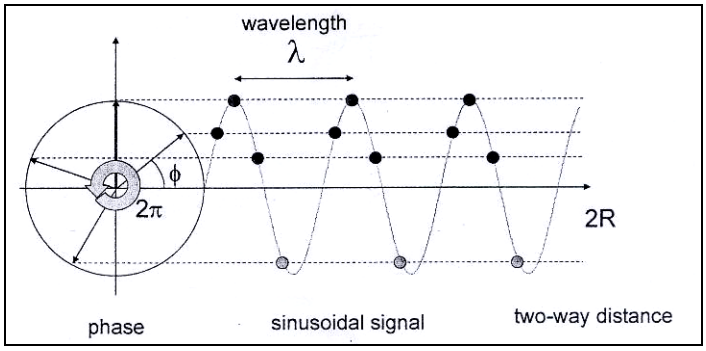


Figure 1.15 : Relation entre le signal sinusoïdal, la longueur d'onde (λ), le trajet aller-retour (2R) et la phase. On peut constater, qu'effectivement, tout multiple de π fois la longueur d'onde engendre la même phase. (Ferretti *et al.*, 2007)

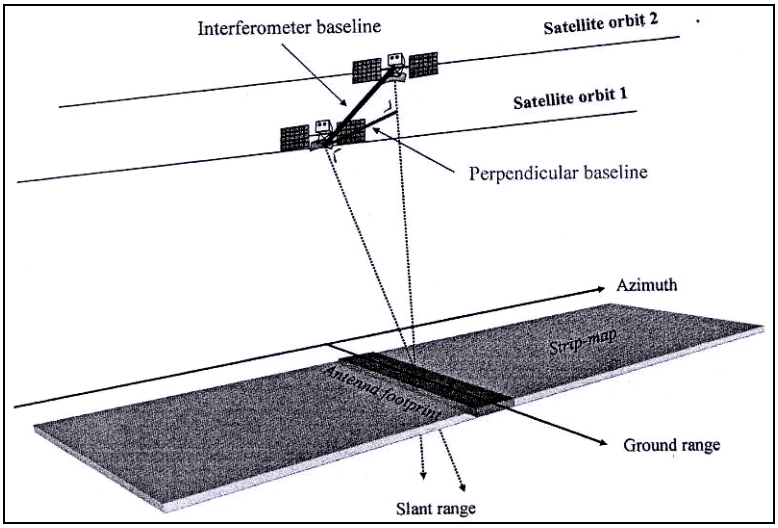


Figure 1.16 : Deux images d'une même scène sont acquises par deux senseurs différents dans le cas d'une mission Tandem depuis deux trajectoires voisines lors de leurs passages successifs au-dessus de la même zone. (Ferretti *et al.*, 2007)

Ensuite, dû au caractère purement sinusoïdal du signal transmis, ce délai est également équivalent à un changement ϕ de phase entre le signal émis et celui reçu (voir figure 1.15).

$$\boxed{\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R} \quad \text{Equation 1.2}$$

▲ Suite au caractère périodique du signal, les distances parcourues qui diffèrent par un multiple entier de la longueur d'ondes introduisent le même changement de phase. En d'autres mots, la phase est en réalité calculée dans la dernière fraction du trajet parcouru par le signal qui est inférieure à la longueur d'ondes. La différence de phase entre le signal transmis et reçu est donc une mesure ambiguë puisqu'elle est fonction d'un module 2π (introduit par la nature sinusoïdale du signal).

1.2.5 Bruit ou tavelure

L'effet « poivre et sel » (« speckle ») d'une image est dû à la superposition des signaux réfléchis par beaucoup de petits objets élémentaires (chaque réflecteur élémentaire d'une dimension au moins égale à la longueur d'onde du signal radar). Ces signaux, qui ont des phases aléatoires dues aux multiples réflexions, s'ajoutent à la radiation directement réfléchie. Cet effet peut être atténué par des images de la zone vue d'un autre angle ou à un autre moment et ce, pour enlever l'amplitude aléatoire et ne garder que l'amplitude uniforme. (Ferretti *et al.*, 2007).

1.2.6 Altitude d'ambiguïté

C'est la variation de hauteur relative à une variation de 2π. Sa valeur permet de transformer les phases en altitude. Elle est fonction de la ligne de base : plus elle est ouverte, plus le taux de frange est élevé et, on obtient une bonne précision altimétrique (voir Partie 1.C.2.1 ci-dessous). Ainsi, selon Derauw, (1999):

$$\boxed{E_a = \frac{\lambda R \sin i}{2B_\perp} \approx \frac{10000}{B_\perp}} \quad \text{Equation 1.3}$$

Si le relief est très faible dans la zone, de faibles altitudes d'ambiguïté sont nécessaires. La raison en est que le bruit de la phase (dû à la décorrélation et aux effets atmosphériques) est de 1/3 de frange, quelle que soit la valeur de l'altitude d'ambiguïté (Raucoules et Carnec, 1999).

1.3 Interférométrie radar

Elle consiste à mesurer des **différences** de parcours de chemin optique relatives entre deux fronts d'ondes cohérents. C'est une méthode de mesure qui exploite les **interférences** intervenant entre plusieurs ondes cohérentes entre elles (c'est-à-dire provenant d'une même source (antenne réceptrice et émettrice), avec une même longueur d'ondes) et vibrant en phase (Ferretti *et al.,* 2007) (voir figure 1.16).

1.3.1 La corrélation

Pour assurer la cohérence des deux fronts d'ondes (condition nécessaire à tout traitement), les deux images doivent avoir été acquises selon des géométries de prises de vue similaires (elles doivent avoir été acquises par le même senseur ou par deux senseurs très proches) et les caractéristiques de la scène vis-à-vis de la rétrodiffusion radar ne peuvent avoir changé entre les deux acquisitions (les cellules contiennent toujours les mêmes « réflecteurs », dans la même position).

- La première condition (corrélation géométrique) nécessite une très bonne répétitivité des orbites, celles-ci doivent être quasi parallèles et séparées par une ligne de base[16] (ou base interférométrique, « interferometric baseline ») d'au plus quelques centaines de mètres. La ligne de base entre les passages produit des angles de vue différents et la combinaison de la distance avec l'angle d'incidence et la position de la plate forme donne une localisation en 3D de points sur la surface de la Terre et peut permettre la restitution d'un modèle numérique de terrain (MNT) d'une grande précision (Stabel et Fischer, 2001).
- La seconde condition (corrélation temporelle), quant à elle, n'est *a priori* jamais satisfaite puisque les acquisitions ne sont pas synchrones mais consécutives (Derauw, 1999). Néanmoins, un terrain avec suffisamment de réflecteurs stables n'ayant subi aucun ou un faible changement, d'une importance similaire à la valeur de la longueur d'onde de la bande C peut déjà réduire l'erreur liée à la non simultanéité des scènes (Stabel et Fischer, 2001).

L'information de distance liée aux différences de temps de parcours est encodée dans la phase du signal. L'interférométrie radar est donc une technique pour extraire des informations sur la surface de la Terre en utilisant **la différence de phases** entre les différents signaux qui atteignent l'antenne lors des observations répétées depuis la même plateforme.

1.3.2 Interférogramme

L'interférogramme, ou figure d'interférence, est l'image d'intensité issue de la superposition des deux fronts d'ondes (Derauw, 1999). C'est le résultat d'une multiplication croisée, pixel par pixel de la première image SAR avec le complexe conjugué de la seconde, dont la phase est la différence de phase entre les deux images (Ferretti *et al.,* 2007).

▲ Communément, la **différence de phases seule**, projetée comme une image « raster », est appelée interférogramme ou image de franges (Tran *et al.,* 2007).

[16] Prise de vue du même endroit à des moments différents → les orbites auront changé, la distance entre les deux est appelée distance interférométrique ou ligne de base et sa projection perpendiculaire, ligne de base perpendiculaire (voir figure 1.15)

1.3.3 Phase interférométrique

Définie comme la différence des phases ($\phi_{Int,\ P1\text{-}P2}$) de deux images après ajustement à une géométrie commune (coregistration (voir C.2.2.1 ci-dessous)) (Thomas et Haynes, 2006). L'information de phase résulte de tellement de facteurs différents qu'elle apparaît comme du bruit impossible à interpréter[17] Effectivement, ce terme dépend des variations de chemin optique. Ces variations ont diverses origines :

- Si le terrain possède du relief, la phase topographique ($\phi_{Topo,\ P1\text{-}P2}$) : terme variant avec tout relief sur le géoïde, c'est la différence d'altitude topographique entre les deux pixels, c'est-à-dire l'altitude du premier par rapport au second. Terme dont la sensibilité dépend de l'ambiguïté d'altitude. Si le terrain ne possède pas de relief, par défaut donc, la phase de terrain plat ($\phi_{TP,\ P1\text{-}P2}$) : phase obtenue pour un terrain étudié totalement plat (absence de topographie).
- Phase orbitale ($\phi_{Orb,\ P1\text{-}P2}$) : terme variant continûment avec les positions orbitales différentes.
- Phase différentielle ($\phi_{Diff,\ P1\text{-}P2}$) : terme variant avec :
    - Les perturbations atmosphériques. Entre les deux passages du satellite, les fluctuations dans la troposphère et l'ionosphère peuvent induire des variations de phase (dues à des variations d'indices de réfraction[18]) qui peuvent être mal interprétées. Ces distorsions sont bien sûr dépendantes des conditions météorologiques aussi bien que de la topographie des sites (montagnes isolées, volcans, etc.). On pourrait les supprimer en comparant une grande série d'interférogrammes et remarquer que le terme de la phase correspondant aux artefacts atmosphériques n'est pas corrélé dans le temps, c'est-à-dire que cette composante varie d'une image à l'autre, contrairement aux déformations du sol[19].
    - Le déplacement de la cible **dans** la direction de la prise de vue. Si une zone se déplace par rapport au restant de la scène observée dans l'intervalle de temps séparant ces deux acquisitions, une différence de chemin optique, directement proportionnelle à la composante de mouvement selon la prise de vue se superposera à la composante topographique.

[17] A cause des différentes sources de décorrélation, la phase de l'interférogramme ne donne pas directement la phase due aux différences de chemins optiques, elle n'en est qu'une estimation

[18] L'indice de réfraction d'un milieu est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. Dès lors, si l'indice de réfraction est supérieur à 1, cela signifie que l'onde radar se propage à une vitesse inférieure à celle de la lumière dans le vide. Dans ce cas, il y aura retard de propagation par rapport à une propagation dans le vide. Ce retard de propagation se traduit par une augmentation de la longueur du chemin optique.

[19] Il faut trouver les franges avec des localisations communes dans les différents interférogrammes afin d'être sûr que les franges représentant bien un mouvement de sol sont corrélées et celles représentant les artefacts atmosphériques sont séparées. Puisqu'on sait que d'une image à l'autre, l'atmosphère change, son influence aussi et donc les franges produites par l'atmosphère ne se trouvent jamais à la même place géographique d'une image à l'autre, donc ne sont absolument pas corrélées (nature spatiotemporelle aléatoire) (Chatterjee *et al.*, 2006).

- Bruit ($\phi_{Bruit,\ P1\text{-}P2}$): dû à la décorrélation (voir point C.1.3.1 ci-dessus).

La différence de phase selon Raucoules et Carnec (1999) s'exprime donc :

$$\phi_{Int,P1-P2} = \phi_{Topo,P1-P2} + \phi_{Orb,P1-P2} + \phi_{Diff,P1-P2} + \phi_{Bruit,P1-P2} + \pm n.2\pi \quad \text{Equation 1.4}$$

Avec n : nombre entier incluant 0 et représente le nombre de cycles de phase

Ou alors :

$$\Delta\varphi = \phi = \frac{2\pi}{h_a} h + \Delta\varphi_{orb} + \frac{2\pi}{\lambda} 2d \quad \text{Equation 1.5}$$

Avec d : déplacement relatif du réflecteur projeté sur la « slant range ».

1.3.4 Interférogramme différentiel

Cette technique est utilisée dans deux buts :

- l'identification et l'analyse quantitative du phénomène de subsidence dans une zone,
- la modélisation du phénomène de déformation avec une grande précision de mesures. (Chatterjee *et al.,* 2006).

▲ Comme le phénomène de subsidence est lent et que la présence de perturbations de phase (comme les artefacts atmosphériques), via un quelconque processus, ont un changement spatio-temporel plus rapide, il est malaisé d'identifier les franges de déformation et d'estimer le taux de subsidence avec exactitude. Ces phénomènes peuvent s'avérer désastreux pour l'utilisation de l'interférométrie simple et différentielle, car une fausse interprétation de ces perturbations induit une erreur de mesure qui peut être largement supérieure à l'amplitude du phénomène que l'on désire mesurer. L'interprétation d'un interférogramme différentiel doit donc être fait avec circonspection et toujours avec l'apport de données annexes (couplé avec un suivi GPS et/ou des nivellements basés au sol) (Derauw, 1999).

Pour la détection de mouvements du sol, on veut que la phase ne soit égale qu'à la composante de mouvement, alors on doit estimer et éliminer la composante topographique ou de terrain plat (en fonction de la présence ou non de relief) et la composante orbitale. Ainsi, on obtient un interférogramme différentiel (DInSAR). Il ne subsiste de ces termes effacés que des termes dits résiduels : ($\phi_{Topo_res,\ P1\text{-}P2}$), fonction de la qualité du MNT (composante topographique résiduelle) et ($\phi_{TP_res,\ P1\text{-}P2}$), négligeable sauf si vraiment les paramètres orbitaux sont très imprécis (de l'ordre du mètre) (composante orbitale résiduelle).

La relation entre le changement de phase $\Delta\varphi$ et la variation de la distance Δr selon Tran *et al*. (2007) est :

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi}\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2}\frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad \text{Equation 1.6}$$

▲ La sensibilité de la phase aux variations de distance dans la direction de la ligne de visée est très forte, un changement de phase de 2π (communément associé à une frange ou à un cycle de couleur) correspond une longueur d'ondes $\frac{\lambda}{2}$, soit, pour un capteur ERS 1-2, à 2,7 cm (Ferretti *et al.*, 2007).

2. Etapes du processus

Il débute par l'analyse de la faisabilité d'un traitement interférométrique et se termine par l'évaluation *a posteriori* de la qualité du produit délivré.

2.1 Etapes préalables

En premier lieu, évaluation de la faisabilité du processus : La décorrélation du signal (due aux zones d'ombrage, aux erreurs de registration, aux variations d'occupation du sol, à la variation de la géométrie de prise de vue) peut *a priori* être considérée comme défavorable. En effet, l'interférométrie nécessite idéalement un signal de phase uniquement lié aux différences de chemin optique parcouru pour en déduire une information fiable. Dès lors, il est essentiel de bien connaître les pertes de cohérence, quelles que soient leurs origines, pour déterminer a priori la faisabilité d'un traitement interférométrique.

2.1.1 Bases (selon Hanssen, 2004)

- La fréquence du radar est-elle adaptée pour mesurer la déformation ? La déformation le long de la ligne de visée est mesurée comme étant une fraction de longueur d'ondes. Une courte longueur d'ondes est renvoyée par de petits objets, par exemple, des feuilles d'arbres. Donc les mouvements aléatoires de ces petits objets dans le temps dérangent l'analyse du signal de phase. Une longueur d'onde d'une vingtaine de centimètres serait parfaite car elle serait réfléchie de manière plus significative par de larges objets, pénétrant sous le feuillage. Puis statistiquement, il y a moins de mouvement de ces objets, ce qui limiterait le dérangement durant l'analyse de phase.
- La ligne de base perpendiculaire[20] est-elle suffisamment courte pour négliger l'influence de la topographie ? Celle-ci introduit la géométrie interférométrique (différence de distance topographique). La valeur absolue varie entre 0 (pas d'influence de la topographie) et 1 à 2 km (grande influence de la topographie).
- La ligne de base temporelle[21] est-elle suffisamment longue pour détecter les phénomènes de déformation qui sont intéressants ET suffisamment courte pour minimiser le bruit dû à la décorrélation temporelle ?
- Le nombre d'acquisitions est-il suffisant pour pouvoir effectuer des mesures exactes et précises de la zone ?

[20] Ligne de base perpendiculaire : Distance effective entre les satellites.
[21] Ligne de base temporelle : Temps écoulé entre les acquisitions des images.

2.1.2 Environnement

- Conditions atmosphériques : Même si les rayons radar ne sont pas entravés par les nuages, l'atmosphère retarde les ondes radio de manière inhomogène, engendrant des erreurs variant spatialement dans les mesures de distance. La détermination des conditions atmosphériques peut également aider à estimer le rapport : $\frac{Signal}{B_{atm}}$ avec B_{atm} : bruit dû à l'atmosphère.

▲ Mais même si on connaît les conditions atmosphériques, leur influence (c'est-à-dire, le changement de délai de propagation) sur la résolution du pixel est difficilement estimée (Wang *et al.*, SD).

- La zone de surface terrestre concernée est-elle suffisamment « réfléchissante » pour repérer des réflecteurs cohérents[22] ? L'inspection des caractéristiques de la surface peut aider à estimer l'apport des zones décorrélées dans l'image.
- Les caractéristiques spécifiques des déformations (estimation de la magnitude, du comportement temporel et de l'étendue spatiale de la déformation attendue) permettent-elles la distinction entre l'amplitude des déformations et l'influence des artefacts ? Les déformations qui ont des caractéristiques similaires, d'un point de vue spatial ou de magnitude, seront difficiles à distinguer du signal d'erreur. Les caractéristiques cinématiques de la déformation jouent aussi un rôle important. Une déformation soudaine, associée à un tremblement de terre par exemple, sera plus simple à suivre qu'une subsidence.

→ Compromis dans le choix des paires d'images dont les dates d'acquisition sont suffisamment **éloignées** pour distinguer un mouvement d'une valeur supérieure à une frange (ainsi il est bien distingué des artefacts alentours) mais suffisamment **proches** pour éviter trop de décorrélations... (Raucoules et Carnec, 1999).

2.2 Processus

Après importation des données

2.2.1 Coregistration (_pwr)

Comme les satellites ne répètent pas exactement leurs orbites et donc qu'ils changent de géométrie à chaque passage, chaque « survol » successif va échantillonner une région légèrement différente de la surface de la Terre (Chang *et al.,* 2004).

[22] Puisque, comme déjà énoncé, opérer des mesures de déformations par interférométrie est seulement possible dans le cas de réflecteurs cohérents, ce qui rend l'eau par exemple inutilisable puisqu'elle change de forme chaque milliseconde. Des lignes de base temporelle de plusieurs semaines excluent également les paysages végétalisés et les zones agricoles, ainsi que les zones en construction.

Le but de l'opération consiste à rendre les images maîtresse (fixe) et esclave (mobile) d'un couple interférométrique exactement superposables de manière à ce que, pour un même couple de coordonnées portée-azimut, le pixel associé dans l'une et l'autre image corresponde au même élément dans la scène observée ; il faut alors les coregistrer. Pour ce faire, il faut superposer les images d'amplitude par couple et déterminer la transformation permettant de passer de la géométrie de prise de vue de l'image esclave à celle de l'image maîtresse (tout en maximisant localement le coefficient de cohérence sur un grand nombre de points d'ancrage). Ensuite, on ré-échantillonne l'image esclave selon cette transformation (transformation bilinéaire par moindres carrés et interpolation au plus proche voisin ou par interpolation quadratique (non conseillé au vu des pertes des caractéristiques de phase et/ou d'amplitude)) (Derauw, 1999).

2.2.2 Estimation de la ligne de base (Baseline Estimation)

Comme vu au point C.1.3.1 ci-dessus, les interférogrammes avec de petites lignes de base perpendiculaires sont particulièrement adéquats pour la mesure de déformations le long de la ligne de visée car le terme de topographie résiduelle est négligeable : ils ne sont plus affectés alors que par le bruit dû à la décorrélation (Raucoules *et al.,* 2007). Pour des lignes de base plus importantes, les effets de mouvement peuvent être extraits si on introduit un MNT disponible pour modéliser et enlever les influences de la phase topographique (Stabel et Fischer, 2001).
La ligne de base est initialement estimée à partir des informations d'orbite contenues dans le fichier «en tête» des images.

▲ Par convention, l'image maîtresse est toujours la plus ancienne.
▲ Il existe une base interférométrique critique « Bc » qui induit une perte de cohérence totale.

2.2.3 Génération de la figure d'interférence ou interférogramme (_int) (Interferogram Generation)

2.2.4 Extraction de la phase de terrain plat (_sint, _fint, _srdem) (Interferogram Flattening)

Extraction de la composante de relief via un modèle de topographie connue ou de la composante de terrain plat via l'ellipsoïde: Comme vu au point C.1.4 ci-dessus, il faut extraire cet élément pour qu'il ne subsiste que la composante due à la déformation. Le précédent interférogramme est divisé en deux parties :

- Partie de basse fréquence, synthétique (_sin) qui est reliée à l'ellipsoïde ou au MNT (transformé dans la géométrie « slant range » de l'image maîtresse _srdem) et à la phase constante (due à la géométrie d'acquisition) (ce qui a été enlevé),
- Partie de haute fréquence, résiduelle (_dint).

Dans le cas où l'orbite des satellites et/ou la précision du MNT sont bonnes, le processus tourne automatiquement.

2.2.5 Filtre et estimation du coefficient de cohérence (Adaptative Filter and Coherence Generation)

- Filtre (_fint) : Application d'un filtre sur l'interférogramme « aplati » pour diminuer l'influence du « bruit ». C'est un filtre passe-bas qui est utilisé puisque le bruit dans un interférogramme est constitué de hautes fréquences. Néanmoins, il réduit considérablement la résolution finale et érode toute transition brusque y compris les sauts de phase constituant les franges. Si les sauts de phase sont érodés, on risque de mal interpréter l'interférogramme et de considérer qu'il n'est constitué que d'une seule frange, il faut donc être vigilant (Derauw, 1999).
- Cohérence (_cc): La cohérence γ est définie comme étant la magnitude du coefficient de corrélation complexe (Tran *et al.*,2007), elle mesure donc la corrélation entre les images maîtresse et esclave c'est-à-dire qu'elle estime les changements qui sont intervenus entre les acquisitions des deux images. C'est un indicateur de la qualité de l'interférogramme. Une haute cohérence (pixel clair, $\gamma = 1$, alors les deux signaux sont parfaitement cohérents et la visibilité des franges est maximale) signifie pas ou peu de changements. Une faible cohérence (pixel foncé, $\gamma = 0$, les deux signaux sont en complète incohérence, il n'y a pas d'interférence) indique un haut degré de changement à l'échelle de la longueur d'ondes (Stabel et Fischer, 2001). Donc, les zones urbanisées semblent propices à ce type d'étude vu que les capteurs (coins de bâtiments, canaux, etc.) sont plus pérennes que ceux d'un champ agricole par exemple (Deguchi, 2005). Ce type d'occupation du sol est donc en général facilement repérable sur les images de cohérence. Mais celles-ci montrent également de nombreuses nuances, différentes de celles observables dans les images d'amplitude. La cohérence constitue donc un canal d'information supplémentaire qui ne doit pas être négligé (Derauw, 1999). On peut relier la perte ou la conservation de la cohérence à des caractéristiques physiques de la scène observée (type d'occupation du sol, couvert végétal, humidité, etc.), mais on peut difficilement corréler cela avec des cartes ou des bases de données qui donnent une description figée d'une situation. Ceci ne signifie nullement que la cohérence ne peut être utilisée comme un outil de classification, mais bien qu'elle permet un autre type de classification puisqu'elle offre une mesure très dépendante de la période d'acquisition et évolue fortement au cours du temps.

▲ Les phases dont la cohérence est en dessous d'un certain seuil ne sont pas considérées dans la suite des traitements.
▲ Idéalement on devrait estimer la cohérence pixel par pixel mais, à part en cas de condition idéale, cela n'est pas réalisable, alors on procède via une fenêtre centrée sur le pixel en question (Hanssen, 2004). Donc, tout comme la phase, la cohérence d'un point est estimée par des moyennes sur des fenêtres autour du point considéré.

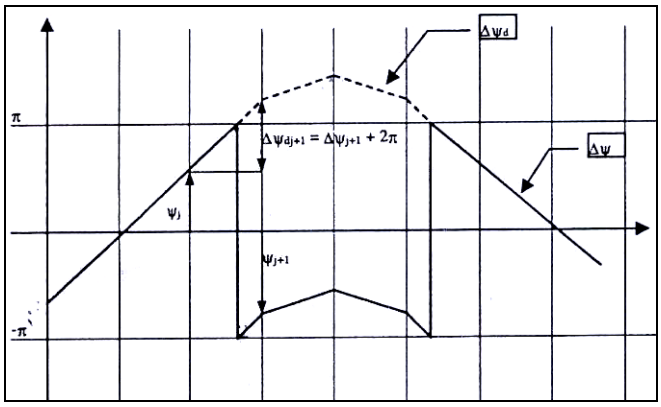


Figure 1.17 : Schéma explicatif de la nécessité et du processus de déroulement de phase (Derauw, 1999)

2.2.6 Déroulement de phase (_upha) (Phase Unwrapping)

Comme vu au point C.1.2.4 ci-dessus, la phase est calculée à partir d'un nombre complexe, elle ne peut être estimée que modulo 2π. Il est donc nécessaire de lever cette ambiguïté et de retrouver la phase vraie en déterminant le multiple de 2π qui lui est associé, c'est ce qu'on appelle le déroulement de phase (voir figure 1.17). Cette étape utilise un algorithme itératif local ou la méthode des moindres carrés (Raucoules et Carnec, 1999). La première méthode mise au point consiste à identifier les chemins d'intégration non valides par détection et par connexion de résidus. On ne peut donc pas choisir n'importe quel chemin d'intégration pour dérouler la phase, la méthode des résidus consiste en la détection des discontinuités de phase de manière à interdire certains chemins d'intégration et le guidage du processus de connexion par une estimation de la cohérence (Derauw, 1999).

2.2.7 Extraction des composantes orbitales (_upha) (Orbital Refinement – Baseline Fit)

Cette étape permet de corriger et de supprimer les possibles inexactitudes des orbites (et donc de la ligne de base) qui pourraient s'apparenter à des franges de déplacement. Ainsi, l'orbite est recalculée afin d'obtenir une valeur plus précise de ce paramètre et des lignes de base correspondantes. Les franges orbitales qui peuvent persister après le retrait des franges de terrain plat sont retirées.

Dans ce module, l'utilisation de points de contrôle (GCP) (Ground Control Point) est requise pour « localiser » exactement les franges qui pourraient être orbitales et enlever les indéterminations d'altitude issues de l'étape du déroulement de phase (calcul de la phase absolue) (Raucoules et Carnec, 1999). Ainsi, le positionnement de ces repères doit s'effectuer selon trois critères essentiels : dans une zone de forte cohérence, dans une zone où le relief est peu présent et dans une frange. La qualité de la position des points de contrôle peut ensuite être évaluée par visualisation de lignes de texte RMSE (Root Mean Square Error) introduites dans le fichier _upha_sml. Si la valeur de l'erreur est située entre 1 et 10 (mètres), alors, la localisation des repères est considérée comme bonne.

▲ Cette étape modifie les fichiers en-tête de l'interférogramme déroulé (il est conseillé de faire une copie des fichiers _upha préalablement).

2.2.8 Ré aplatissement (_reflat_upha) (DEM Reflatenning)

Le principe est le même que celui de l'étape 2.2.4, sauf que les facteurs de correction sont très précis et qu'ils sont destinés à l'élimination totale de toutes les franges autres que celles de déplacement.

2.2.9 Transformation de l'information de phase en information de différences d'altitude (en mètres) (Phase To Displacement)

Cette étape se termine par la génération d'une carte de déplacement dans la direction de la ligne de visée (_geo) ou de manière verticale (_VD) : NOTRE BUT !

Un fichier avec des points de contrôle est, à nouveau, nécessaire. Cette fois pour déterminer les zones qu'on considère comme n'ayant subi aucun mouvement, donc, fixes.

Partie 2. Résultats

Satellites	Date	ERS	Ascen-Desc	Heure GMT	Numéro Orbite
ERS-1/2	11/02/1996	1	Descending	3:26	23935
	12/02/1996	2	Descending	3:27	4254
	25/08/1997	2	Descending	3:26	12268
	23/03/1998	2	Descending	3:26	15274
	30/08/1999	2	Descending	3:26	22789
	13/12/1999	2	Descending	3:27	24292
	23/10/2000	2	Descending	3:27	28801
ASAR	17/11/2003		Descending	2:56	8961
	5/04/2004		Descending	2:57	10965
	19/07/2004		Descending	2:57	12468
	22/10/2007		Descending	2:56	29502

Tableau 2.1 : Caractéristiques des images disponibles pour l'étude de Hanoi

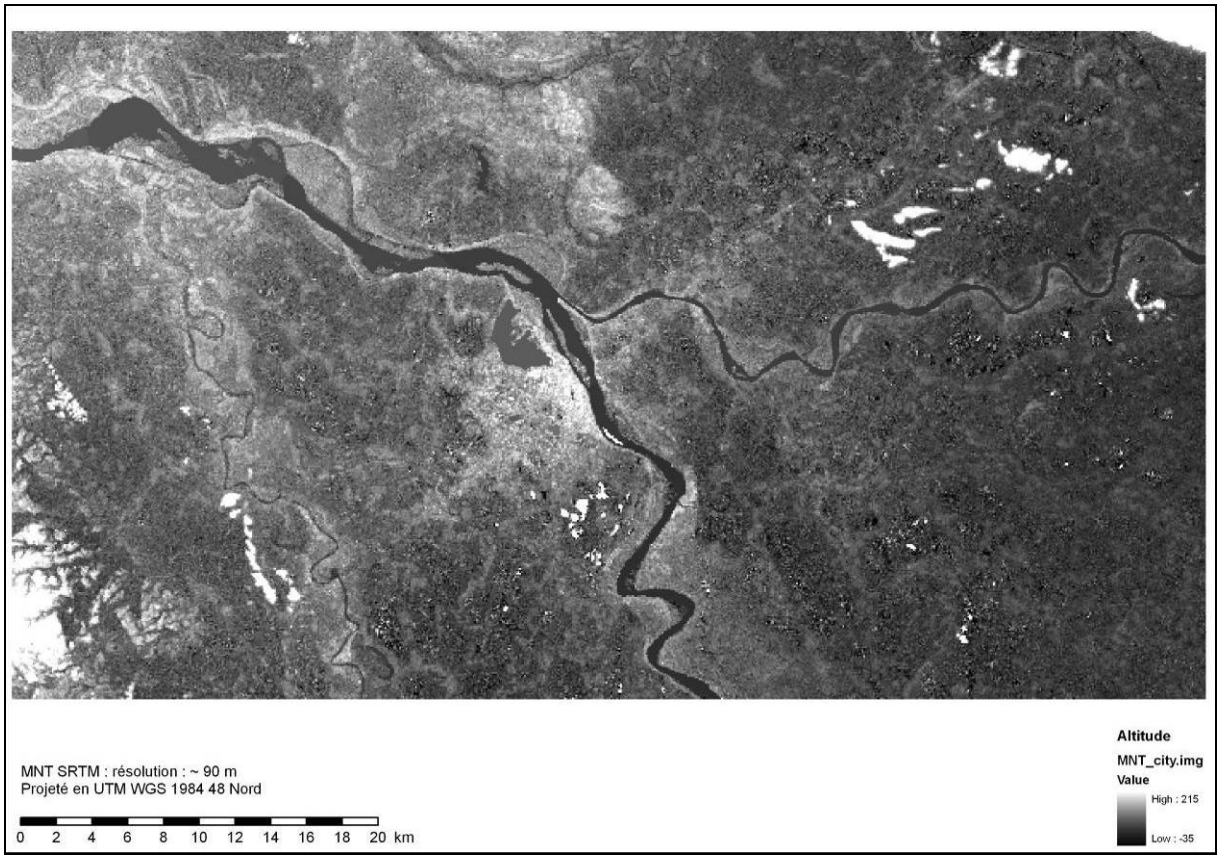


Figure 2.1 : Modèle numérique de terrain géoréférencé en UTM 48 Q, WGS 84

A. Démarche personnelle

Comme on l'a vu dans la section précédente, une bonne connaissance de la zone s'avère indispensable pour mener à bien toute la démarche, tant au point de vue de l'interprétation des résultats que de l'injection de données dans le logiciel. Ceci justifie pleinement la campagne de terrain. Il a fallu également un apprentissage presque autodidacte du logiciel de traitement d'images utilisé et spécialement le module approprié aux images radar.
Ainsi, le procédé « à tâtons » utilisé ne doit-il pas être sanctionné mais apprécié comme une démarche scientifique à part entière.

1. Démarche assistée par ordinateur

1.1 Données

1.1.1 Images radar

Des images ERS-1/2 (7 images) et ASAR (4 images) de la zone de Hanoi (voir tableau 2.1) ont été mises à notre disposition.

1.1.2 Images optiques

- Quickbird de l'institut : deux images panchromatiques et deux multispectrales nuageuses acquises à l'Institut des Sciences Géologiques de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam à Hanoi.
- Google Earth sur base d'imagettes Quickbird datant de 2003, la résolution est de 0,6 m[23]. La mosaïque extraite est géoréférencée en WGS 84, Zone UTM 48 Q, ellipsoïde Everest.
- Modèle numérique de terrain extrait du site de la NASA[24], datant de 2000 lors de la mission Endeavour, dont l'échantillonnage est réalisé à 3 secondes d'arc, d'une résolution en X et Y de 90 m et inférieure à 15 m en Z. Les lacunes radar sont compensées par des données correctes dans la plupart des cas (voir figure 2.1).

▲ Le MNT peut présenter des erreurs, notamment avec l'influence des zones de hauts bâtiments.

1.1.3 Cartes NON GÉORÉFÉRENCÉES

- Carte topographique (F-48-68-D-c) au 1/25.000 de 2003,
- Carte topographique (F-48-80-B-a) au 1/25.000 de 2003,
- Carte topographique (6151 II) au 1/50.000 de 1980,
- Carte topographique (6150 I) au 1/50.000 de 1980,
- Carte topographique (F-48-11) au 1/250.000 de 1954,
- Carte topographique (F-48-15) au 1/250.000 de 1954,
- Carte MapInfo (en cours de réalisation), version informatisée.

[23] http://www.digitalglobe.com / http://srtm.usgs.gov/mission
[24] http://srtm.csi.cgiar.org/

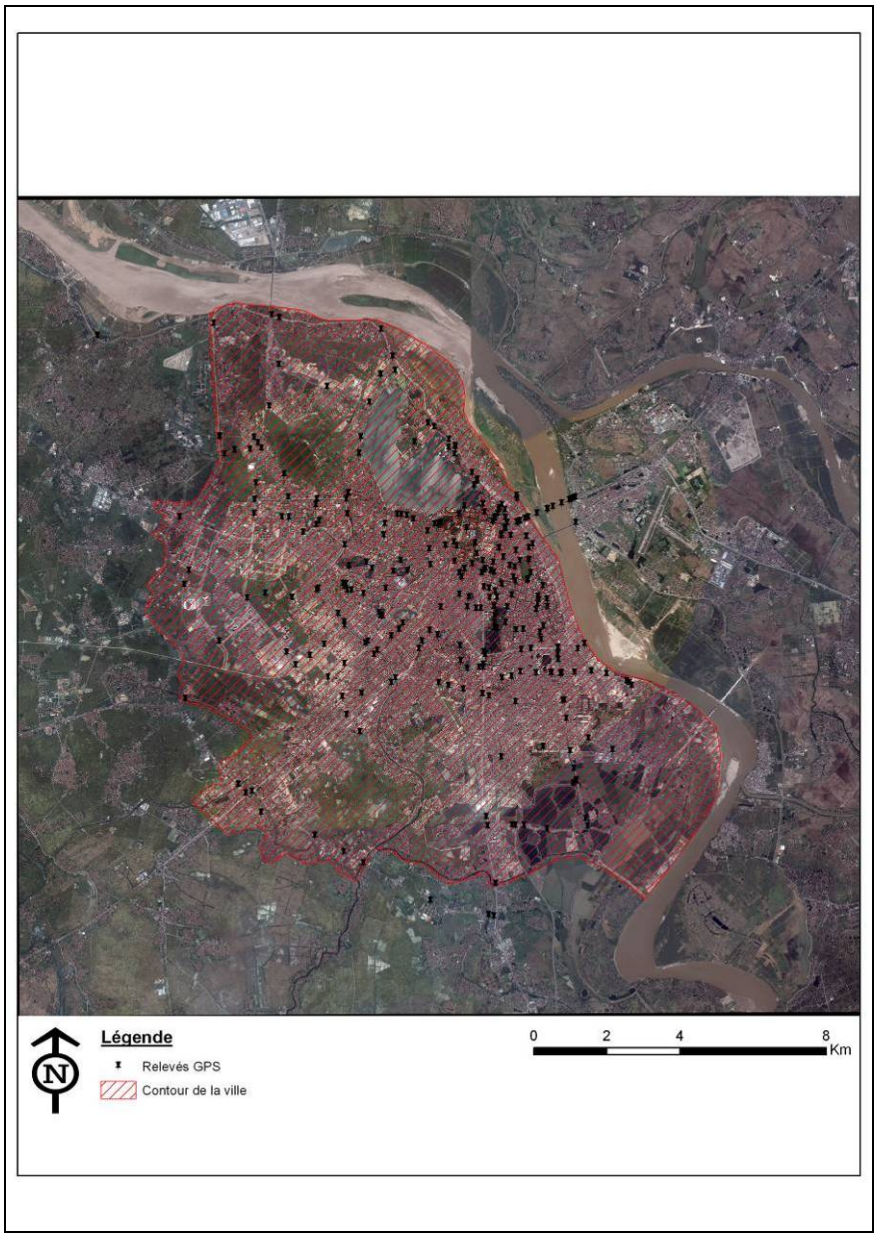


Figure 2.2 : Image Google Earth géoréférencée en UTM 48 Q, WGS 84 (2003) avec les limites de la zone d'étude et les points GPS sélectionnés sur le terrain

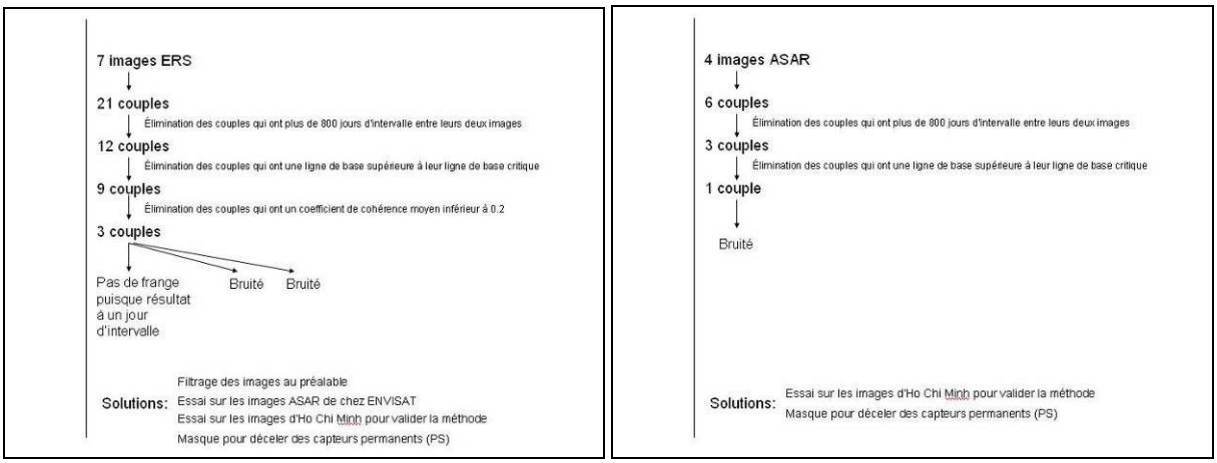


Figure 2.3 : Schéma d'élimination des couples d'images ERS et ASAR

▲ L'essai de géoréférencement du shapefile fourni au format MapInfo sur l'image disponible de Google Earth© fut non concluant, un écart de plusieurs centaines de mètres a été systématiquement constaté, quels que soient le datum et la projection utilisés.
▲ La méthode traditionnelle (à partir des coordonnées carte et des croisillons) fut également impossible à mettre en œuvre, aucune des cartes n'étant parfaitement superposable aux systèmes de référence connus dans le logiciel ERDAS Imagine 9.1.

1.1.4 Campagne de terrain

La zone d'étude s'étend sur un peu moins de 160 km² incluant le centre-ville, la périphérie et la conurbation (voir figure 2.2). Dans un premier temps, nous avons procédé à une sélection de points GPS à des endroits remarquables dont les coordonnées en X et Y sont correctes à 1 m près en moyenne mais celles en Z sont imprécises (entre 3 et 5 m de précision), rendant cette donnée non exploitable. Dans un second temps, le positionnement et l'échantillonnage des points GPS ont été effectués sur base de la carte topographique de Hanoi de 2003 et sur celle de MapInfo de 2008.

1.1.5 Données moyennes mensuelles

Des données de température, de pluviosité au niveau de Hanoi et de hauteur d'eau et de débit du Fleuve Rouge entre 1995 et 2007 ont été recueillies à Long Bien par l'Institut des Sciences Géologiques de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam à Hanoi. Les données hydrologiques sur les aquifères et le Fleuve Rouge entre 1995 et 2004 ont été reprises de S. Jusseret (2006).

1.2 Logiciels

Les logiciels utilisés sont principalement ENVI 4.4 avec notamment le module d'interférométrie radar SARScape ainsi que ArcGIS 9.2 et MapInfo Professional 8.0 pour les traitements basiques d'images et de cartographie.

2. Processus

2.1 Estimation de la faisabilité

La sélection des images paires appropriées s'effectue sur base des dates d'acquisition et des valeurs des lignes de base (Raucoules et Carnec, 1999) (quelles images ne sont pas exploitables et pourquoi ?) (voir figure 2.3):

- Estimation de la ligne de base temporelle : élimination des couples dont le Δt dépasse 800 jours (valeur empirique),
- Estimation de la ligne de base interférométrique : élimination des couples dont la ligne de base a une valeur supérieure à la ligne de base critique.
- Lancement des processus jusqu'à l'étape d'estimation de la cohérence : élimination des couples dont le coefficient de cohérence moyen est inférieur à 0,2.

	Couple	Ligne de base temporelle (en jours)	Ligne de base spatiale (en m)
ERS	**1**	1	16,523
	2	561	362,634
	3	771	606,061
	4	1296	1435,758
	5	1401	180,753
	6	1716	1468,431
	7	560	382,162
	8	770	616,879
	9	1295	1446,708
	10	1400	193,813
	11	1715	1478,989
	12	210	237,584
	13	735	1066,722
	14	840	205,484
	15	1155	1097,956
	16	525	829,784
	17	630	429,284
	18	945	862,347
	19	105	1257,338
	20	420	63,468
	21	315	1291,796
ASAR	**1**	140	1606,566
	2	245	1096,971
	3	1435	715,766
	4	105	510,425
	5	1295	891,349
	6	1190	381,068

Tableau 2.2 : Couples formés par les images ERS et ASAR

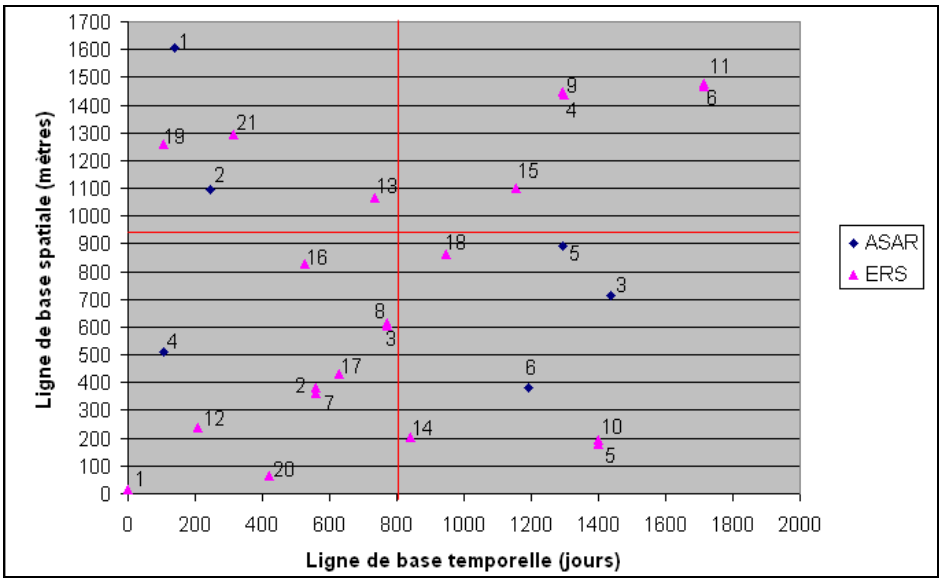


Figure 2.4 : Sélection des couples d'images dont la ligne de base temporelle est inférieure à 800 jours et la ligne de base spatiale inférieure à la ligne de base critique d'environ 950 mètres

→ Il reste 3 couples à traiter avec les images ERS (voir tableau 2.2) (voir figure 2.4) :

11/02/1996 12/02/1996	25/08/1997 23/03/1998	30/08/1999 23/10/2000
$B_\perp$ = 16 m Δt = 1 jour	$B_\perp$ = 238 m Δt = 210 jours	$B_\perp$ = 63 m Δt = 420 jours
Couple 1	Couple 2	Couple 3

→ Il ne reste aucun couple à traiter avec les images ASAR (voir tableau 2.2)

2.2 Génération de l'interférogramme et coregistration

Avec tous les paramètres par défaut (voir figure 2.5).

2.3 Extraction de la phase de terrain plat

Avec l'utilisation d'un MNT (SRTM-3DEM) que l'on a extrait avec les coordonnées de la zone : UTM 48 Nord WGS 84. Des points de contrôle sont nécessaires si le MNT extrait n'est pas géoréférencé ou si l'orbite est peu précise (voir figure 2.6).

▲Utilisation pour tous les couples du même MNT extrait à partir de la plus ancienne image.

2.4 Filtre et estimation du coefficient de cohérence

Comme vu ci-dessus, le dernier critère d'exclusion d'un couple est celui du coefficient de cohérence. Comment expliquer que 6 des 9 couples qui restaient obtiennent un coefficient d'une valeur si basse ?

- Ouverture de la base interférométrique → les couples ont tous des bases interférométriques sous leur base critique,
- Non parallélisme des orbites → contraire à l'hypothèse,
- Changement de l'angle d'incidence → tous à 23° d'après le fichier en-tête,
- Forte pente locale → la zone est plate,
- Positions relatives des diffuseurs au sein des pixels variables au cours du temps → POSSIBLE car beaucoup de lacs et de rizières et urbanisation galopante,
- Les variations climatiques → POSSIBLE avec un simple changement de l'orientation ou de l'intensité du vent provoquant des variations de couvert végétal, avec des variations de la pluviométrie induisant des variations d'humidité du sol (période sèche - humide) et les changements de conditions atmosphériques peuvent induire des artefacts.
- Les paramètres pris en compte sont ceux par défaut : taille de la fenêtre de cohérence : 3, taille de la fenêtre du filtre adaptatif : 4, seuil du filtre adaptatif : 0,25.

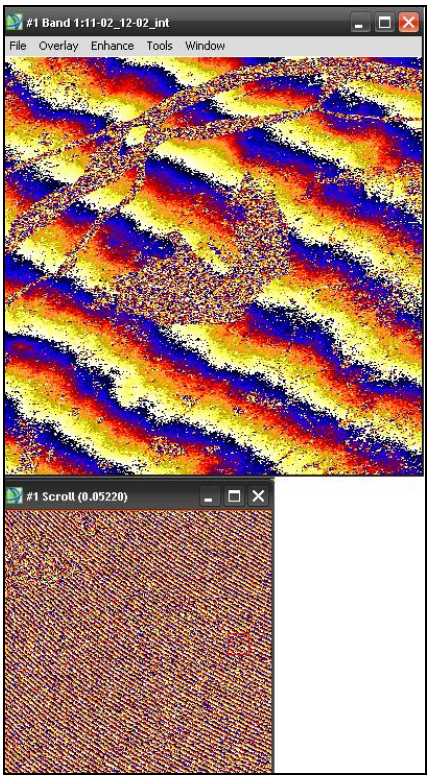


Figure 2.5 : Exemple d'extrait d'interférogramme (_int)(couple 1). On aperçoit nettement les franges dues à la phase de terrain plat et topographique (bien que la zone soit quasi plate)

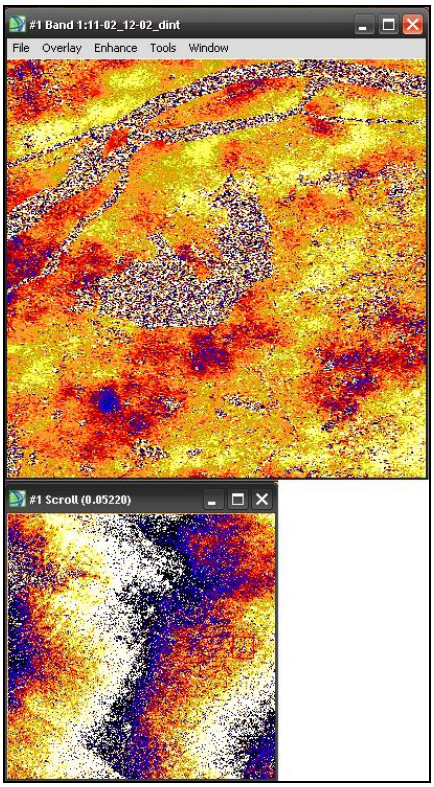


Figure 2.6 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati (_dint) (couple 1). On aperçoit nettement que les franges dues à la phase de terrain plat et topographique ont été éliminées.

2.5 Déroulement de phase

La phase n'est pas déroulée pour des pixels dont la valeur du coefficient de cohérence est sous le seuil défini par défaut de 0,25.

2.6 Extraction des composantes orbitales

Comme on l'a vu précédemment, un fichier avec des points de contrôle est nécessaire. Ce fichier vecteur est calibré sur l'interférogramme aplati (_fint) et n'est valable que pour un seul couple (_evf → _xml).
Les points de contrôle choisis doivent être bien distribués sur l'ensemble de la scène, localisés sur la (ou les) franges résiduelles orbitales, sur une zone sans relief (_srdem) et dans une zone de bonne cohérence (_cc) (voir figure 2.7). Il n'est pas nécessaire à cette étape de connaître leur altitude, le logiciel la déduit à partir du MNT.

2.7 Ré-aplatissement

Même étape que celle ci-dessus (A.2.3.).

2.8 Transformation de l'information de phases en information de différences d'altitude (en mètres)

A nouveau, pour cette étape, des points de contrôle sont nécessaires mais leurs propriétés de sélection sont différentes : le point d'altitude connue est considéré comme fixe dans le temps (ou dont la différence d'altitude est connue). C'est là que la campagne de terrain prend tout son intérêt car durant mes pérégrinations à Hanoi, la définition de visu des zones stables et des zones mouvantes fut possible, ainsi que la prise des points GPS à ces endroits particuliers. Le seul et épineux problème est qu'il a été impossible de les introduire de manière automatique dans le logiciel. Effectivement, étant donné que les images ne sont géocodées qu'à la fin de cette étape-ci, introduire les points selon des coordonnées prédéfinies de manière automatique était inexécutable. La sélection des points et l'insertion des coordonnées UTM correspondantes se firent donc de manière manuelle. Celle-ci s'est effectuée avec, en parallèle, une carte projetée superposée des points GPS (inversée en miroir et inclinée de 23° pour qu'elle soit « semblable » aux images radar dans la vue affichée sous ENVI) et une image d'amplitude. Ainsi, on a pu retrouver, visuellement, les pixels correspondant à la localisation approximative des points GPS (voir figure 2.8) et déterminer les coordonnées UTM correspondant à celles exprimées en coordonnées locales « ligne-colonne ». Malheureusement, si l'idée était bonne, intégrer ces coordonnées s'avéra d'une trop grande imprécision et les résultats furent de mauvaise qualité. L'option de choisir les points mais de laisser le soin au logiciel d'intégrer lui-même les coordonnées d'altitude correspondantes fut donc décidée (_evf→ _disp).
Les paramètres sélectionnés sont ceux par défaut : la taille de la grille est de 25 et le seuil de cohérence est de 0,3. L'interpolation choisie est la convolution quadratique.

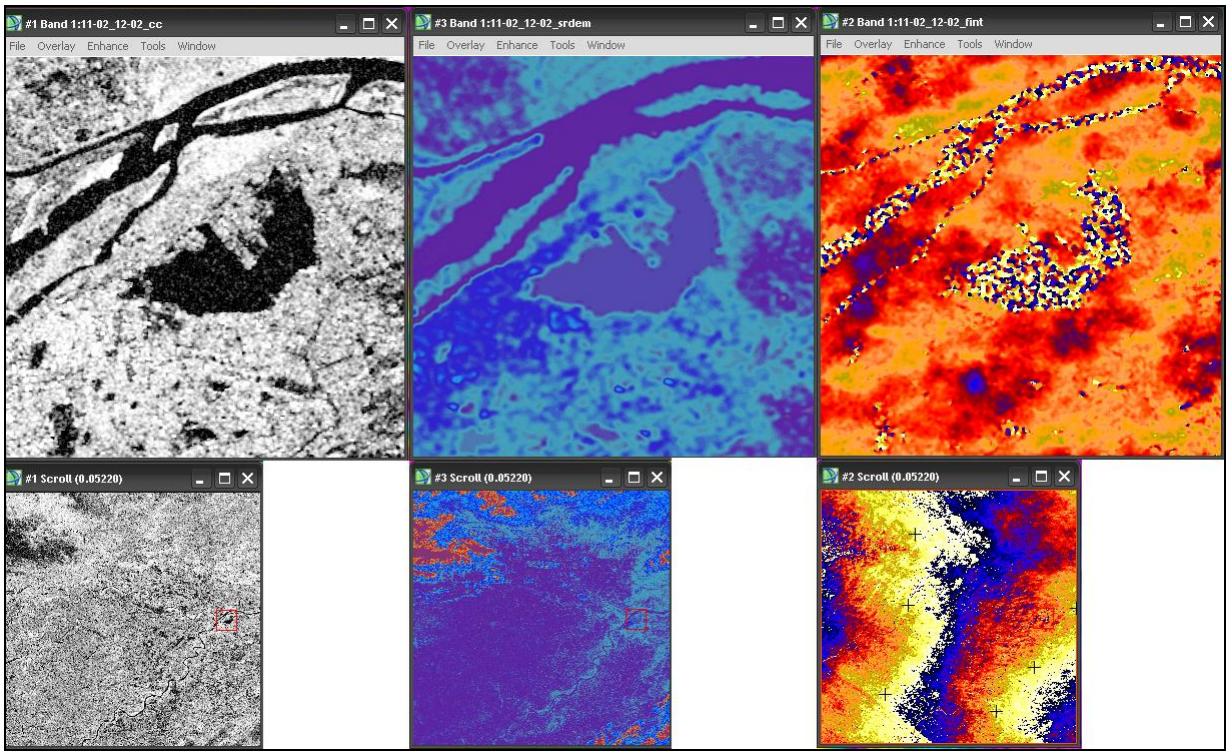


Figure 2.7 : Sélection des GCP (croix sur la fenêtre inférieure droite) en parallèle sur une image de cohérence (_cc), de relevé de terrain selon la ligne de visée (_srdem) et l'interférogramme filtré (_fint)

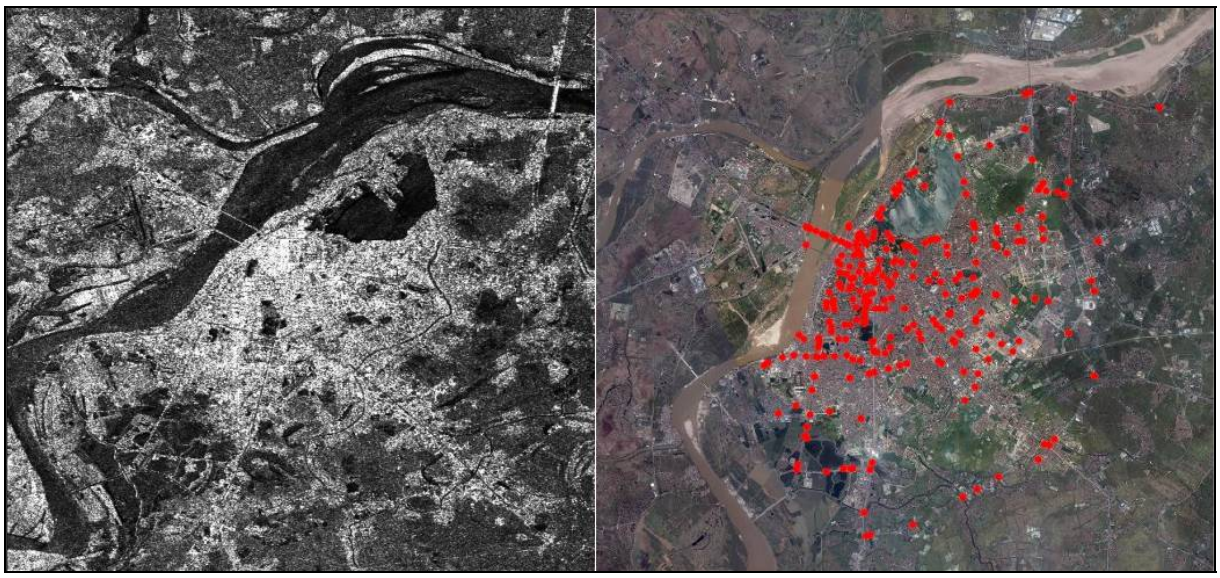


Figure 2.8 : Correspondance approximative entre les points GPS sur terrain projeté sur l'image Google Earth de 2003 (en miroir et inclinée de 23°) (à droite) et l'image d'amplitude du 11-02-1996 (à gauche)

3. Résultats

3.1 Elimination des couples

- 1er couple : En un jour d'intervalle, il n'y a pas assez de déplacements et donc pas de franges visibles, c'est normal. Mais l'image de cohérence, avec une valeur moyenne de 0,6, est de qualité acceptable, avec un manque manifeste d'homogénéité, c'est-à-dire qu'il y a quelques bonnes zones à certains endroits et d'autres non (à un jour d'intervalle, on devrait obtenir une cohérence égale à 0,8) (voir figure 2.9). Les explications probables seraient que, à la base, les images sont déjà fort « bruitées » par les conditions atmosphériques (climat tropical de mousson, avec une moyenne d'humidité de 84%), par les occupations du sol car, même si le paysage est essentiellement urbain, en périphérie, il subsiste des rizières toujours en activité et une partie de la nouvelle ville a été créée sur des lacs asséchés (voir figure 1.6).

La sélection des GCP fut aisée, une frange distincte se dessine, le positionnement des points se fait facilement et une RMSE de 16 [25] est obtenue, ce qui est dans la fourchette des valeurs tolérées [26] (voir figure point 2.6). On obtient des valeurs de déplacement de l'ordre du millimètre, c'est une valeur à prendre avec circonspection car même si elle semble cohérente, il serait étonnant qu'il se passe une déformation de cet ordre en un seul jour… (voir figure 2.10).

- 2ème couple et 3ème couple: Pour chaque couple, on peut constater, sur l'interférogramme filtré (voir figure 2.11) et prêt à être déroulé, l'absence manifeste de franges et la présence importante de bruit. L'image de cohérence nous donnait déjà une indication quant à la qualité probable du résultat (voir figure 2.12 et suivante), mais la visualisation de l'image de l'interférogramme filtré nous conforte. Nous décidons néanmoins, envers et contre tout, de continuer mais à l'étape de la sélection des GCP, les points ne pouvaient être choisis de manière rationnelle, engendrant une série d'erreurs. De fait, la RMSE à ce stade est proche de 0 (de l'ordre de 10^{-8}), ce qui signifie que pratiquement aucune correction n'a été effectuée. Le résultat est parlant, l'image s'affiche sous forme d'une série disparate de pixels (voir figure 2.14 et suivante) et donc sans franges.

L'absence de franges est un frein au développement du processus, aucun résultat probant ne peut être extrait sans elles.

[25] La RMSE (Root Mean Square Error) (Erreur Moyenne estimée par la méthode des moindres carrés) est exprimée en mètres.
[26] Le mot « toléré » est justement choisi car l'intervalle de valeurs est logiquement de 1 à 10. Mais des valeurs de l'ordre de la dizaine sont tolérées.

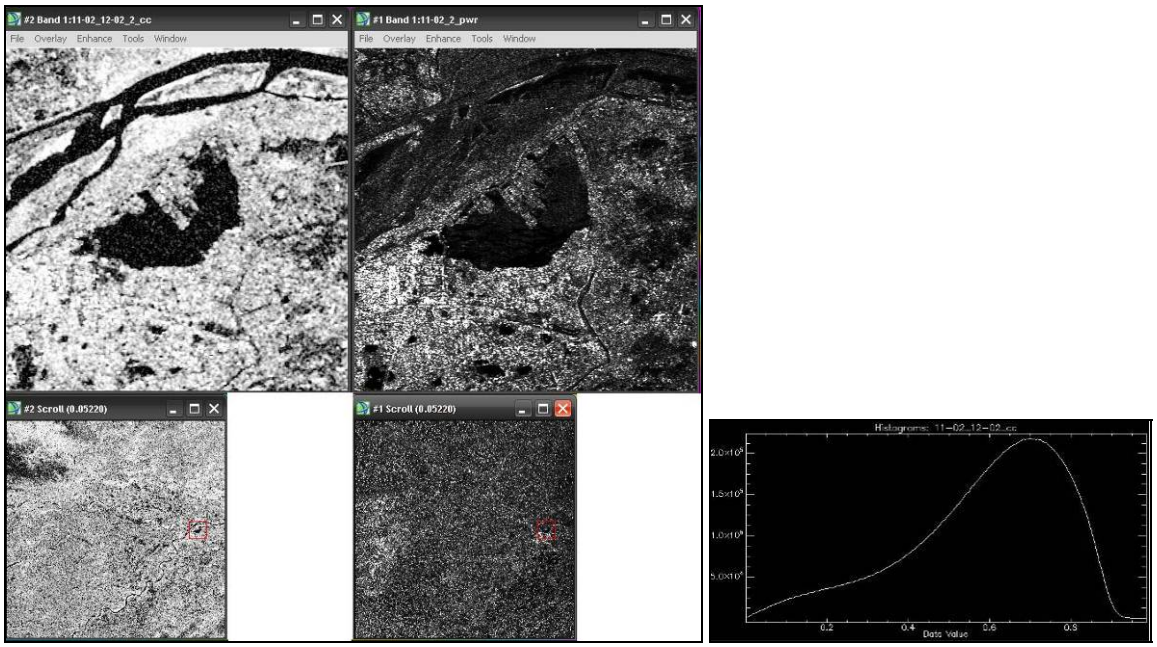


Figure 2.9 : Image de cohérence du 1er couple (11-02_12-02) en correspondance avec une des images d'amplitude du couple et l'histogramme des valeurs de coefficient de cohérence pour ce couple.

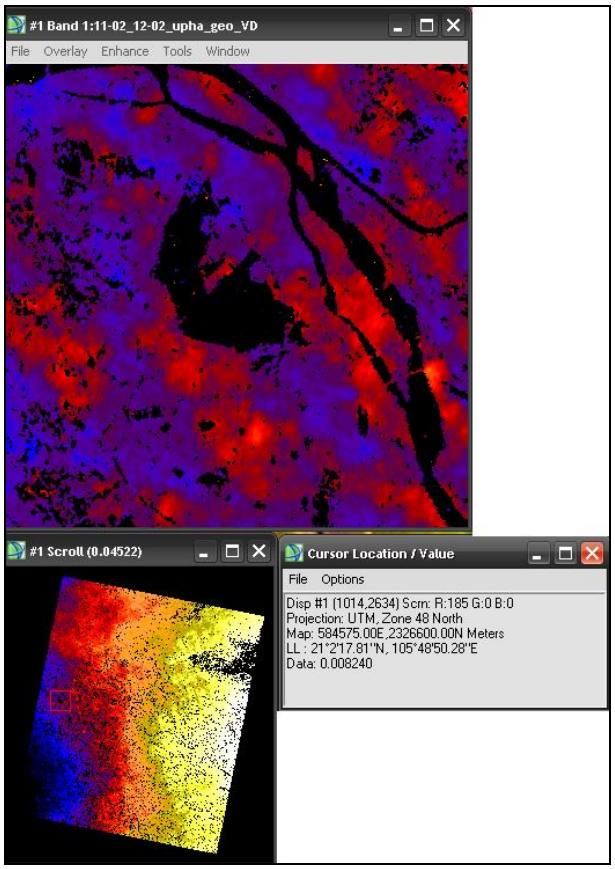


Figure 2.10 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati, filtré, déroulé, corrigé et géoréférencé (_upha_VD) (couple 1). On aperçoit quelques parties de franges (exprimées par des teintes différentes) signifiant peut être un changement d'altitude vertical de ces pixels.

Néanmoins, on peut constater que des résultats existent même s'ils sont peu précis. Pour l'image finale de chaque couple, les pixels ont la valeur du déplacement qui s'est produit entre les deux acquisitions. Une classification sommaire de ces trois images donne une idée des mouvements… (voir tableau 2.3). Celle-ci nous permet une analyse qualitative (à savoir la localisation) de la subsidence, sans pour autant savoir avec exactitude sa valeur. Lorsque la mesure de déplacement est négative (entre -10 m et 0 m exclus, à savoir, s'il y a eu subsidence), la nouvelle valeur du pixel sera de 2 et apparaîtra en rouge (voir figure 2.16 et suivante).

▲ Les pixels dont la valeur de cohérence était inférieure à 0,25 (lacs, fleuve, rizières, etc.) n'ont pas été traités. Il se peut que ces zones soient en subsidence également mais la technique est impuissante dans ce cas-là (pixels de valeur NaN).
▲ Les résultats sont à prendre avec grande prudence vu qu'ils découlent d'images de grande imprécision.

3.2 Les questions à se poser

- Y a-t-il d'autres images qui pourraient participer à l'étude ? Oui, au vu de l'article de Raucoules et Carnec (1999), il y en a au moins trois autres.
- Quel intervalle de temps minimum serait suffisant pour observer des déformations du sol d'une valeur supérieure à celle engendrée par le bruit et sans pour autant engendrer une trop grande décorrélation temporelle ? Un compromis est à trouver, on l'estime entre 40 et 100 jours.

B. A quoi est due l'absence de résultat significatif?

1. Limites

1.1 Les données

- Initialement, les données sont de mauvaise qualité, elles sont très bruitées, et les couples formés ont trop de différences,
- Présence d'une topographie non compensée,
- La grande superficie de l'image radar (100 x 100 km) à traiter alors que la zone de Hanoi ne fait que 40 x 40 km.

1.2 Le processus

- Les **paramètres** utilisés lors des différentes étapes sont ceux **par défaut** (l'aide du logiciel conseille de garder les seuils par défaut dans les différentes étapes car ils ont été calculés pour les images ERS). Pour plus de précision, il aurait été préférable de choisir nous-mêmes ces paramètres afin d'assurer une meilleure qualité du résultat final. Cela concerne notamment la coregistration (les paramètres de taille de fenêtre, des positions centrales, etc. sont ceux proposés par le logiciel), la cohérence (la taille de la fenêtre et le seuil de cohérence en dessous duquel le pixel n'est pas considéré comme « cohérent », le choix du filtre : adaptatif ou boxcar, le choix des paramètres de ces filtres) ainsi que l'extraction de la composante topographique (MNT par défaut).

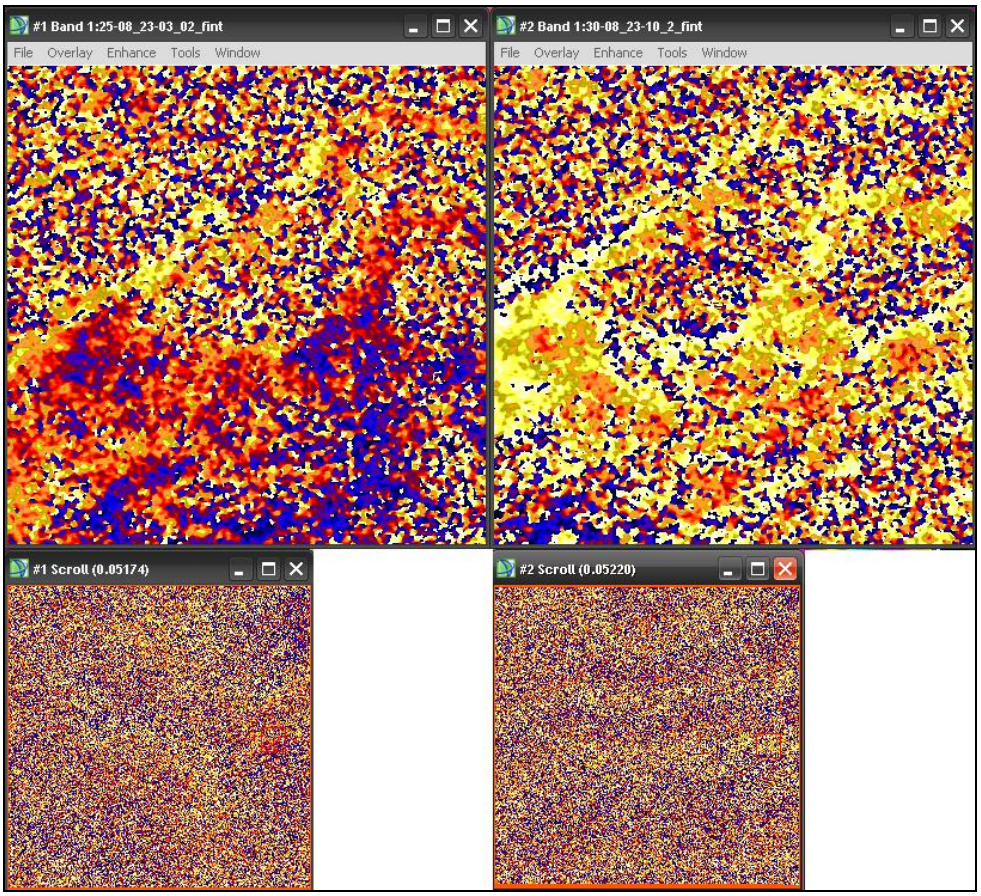


Figure 2.11 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati et filtré (_fint) (couple 2 et 3). On aperçoit très difficilement des franges, le bruit est omniprésent sur les images.

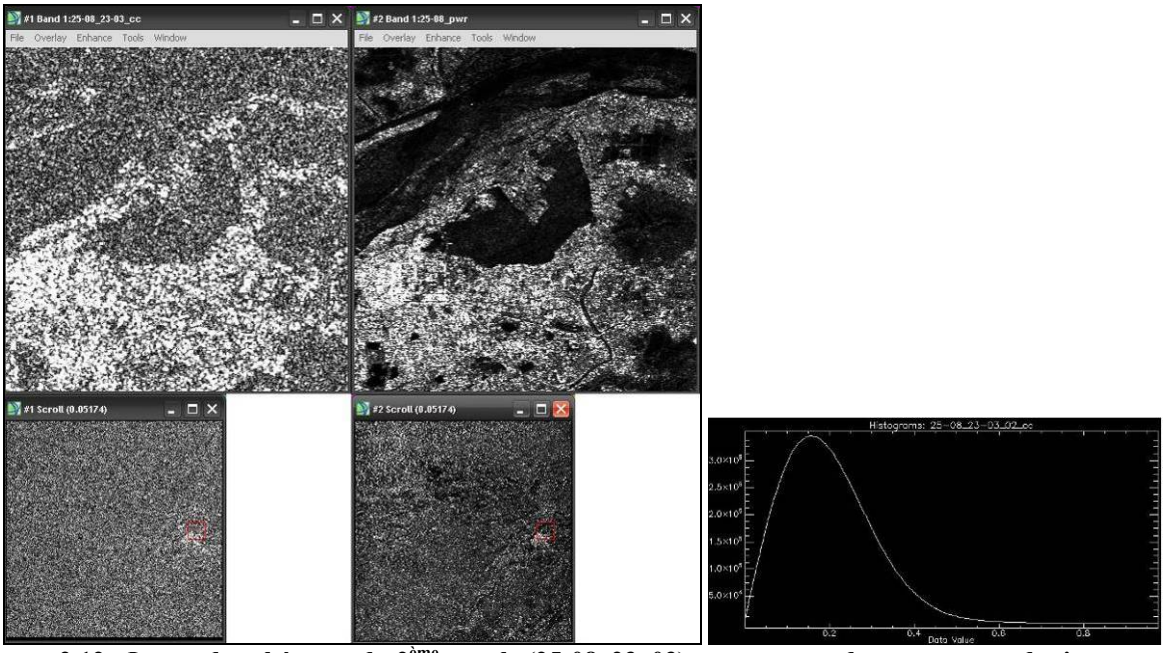


Figure 2.12 : Image de cohérence du 2ème couple (25-08_23_03) en correspondance avec une des images d'amplitude du couple et l'histogramme des valeurs de coefficient de cohérence pour ce couple.

- La **perte de cohérence** (décorrélation géométrique et temporelle) est due à :
  - la végétation croissante (rizières),
  - une ligne de base trop grande,
  - une séparation temporelle importante,
  - des conditions climatiques différentes entre les deux acquisitions (si une image est extraite pendant la saison des pluies, les surfaces mouillées induisent une perte de cohérence. La meilleure période pour une prise de vue est de novembre à mars).
- L'extraction des franges orbitales : **Localisation** optimale des **points de contrôle**. Comme vu ci-dessus, le problème est que les points doivent être choisis sur l'interférogramme filtré mais l'identification est difficile (bruit) et en plus, l'exactitude du placement des points laisse à désirer (fenêtre de 9 pixels).
- Le géocodage **: Localisation** optimale des **points de contrôle**. L'utilisation de cartes topographiques d'une date différente de celle de l'image radar va poser problème car les points d'une certaine altitude à l'époque de la réalisation de la carte auront une autre altitude à une autre époque (celle de l'image par exemple) du fait de la subsidence (Images de 1996 à 2000, relevés de terrain datant de 2008 et cartes topographiques de 1993 et 2003). L'utilisation de mes propres points pris sur le terrain avec un simple GPS de randonnée de marque Garmin Vista pour extraire une altitude était proscrite du fait de la précision de celui-ci (entre 3 et 5 m dans les meilleures conditions de réception des satellites).

2. Solutions techniques

2.1 Processus

- Pour la perte de cohérence :
  - Choisir une longueur d'ondes acquisitive moins sensible : il serait opportun de travailler avec un autre satellite et/ou sur une autre bande (comme la bande L sur JERS 1 et PALSAR) pour réduire le bruit dû à la perte de cohérence. En effet, la longueur d'ondes, de 23 cm, est moins sensible aux déformations qu'une longueur d'ondes plus courte.
  - Filtrer les images d'amplitude pour réduire le bruit avec le risque de perdre trop d'informations.
  - Utiliser la polarimétrie radar (Kim *et al.,* 2007)

- Pour le géocodage :
  - L'idéal aurait été de co-registrer dès le début l'image d'amplitude avec une image optique de bonne résolution (non disponible) ou à partir de cartes topographiques (mais celles-ci furent impossibles à géoréférencer sans la référence exacte du datum utilisé).
  - Pour une meilleure précision des points de contrôle, l'idéal aurait été de disposer d'une station GPS précise, exploitant le déphasage des signaux GPS et éventuellement d'un récepteur RTK permettant d'effectuer ces corrections en temps réel à partir du réseau de mesures existant à Hanoi.

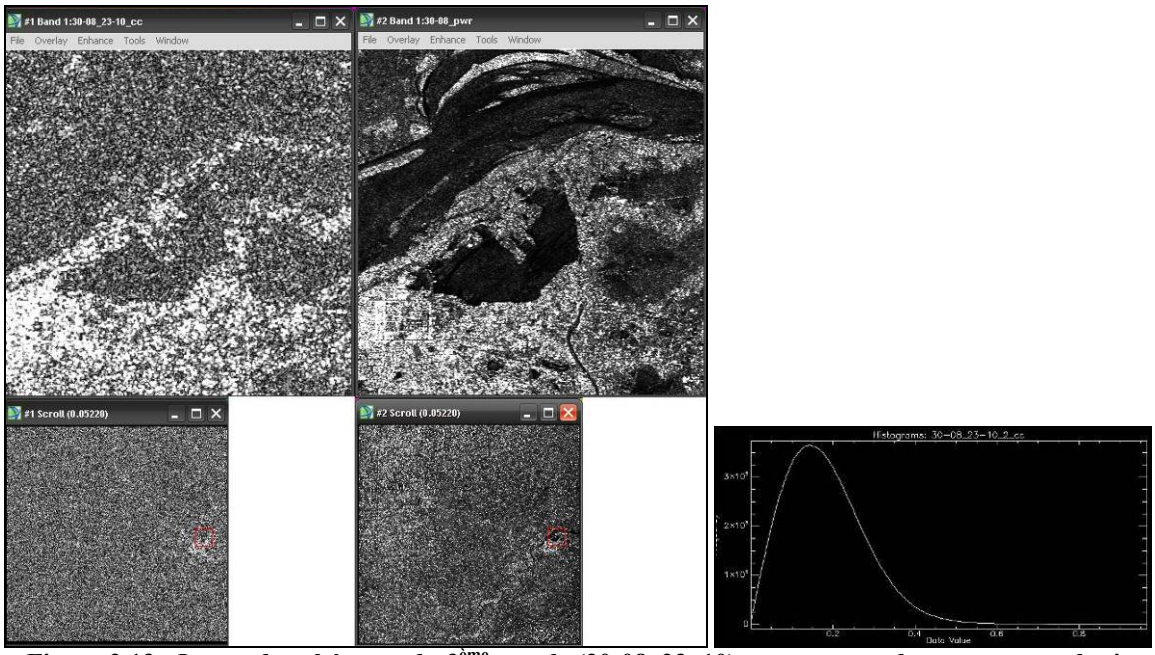


Figure 2.13 : Image de cohérence du 3ème couple (30-08_23_10) en correspondance avec une des images d'amplitude du couple et l'histogramme des valeurs de coefficient de cohérence pour ce couple.

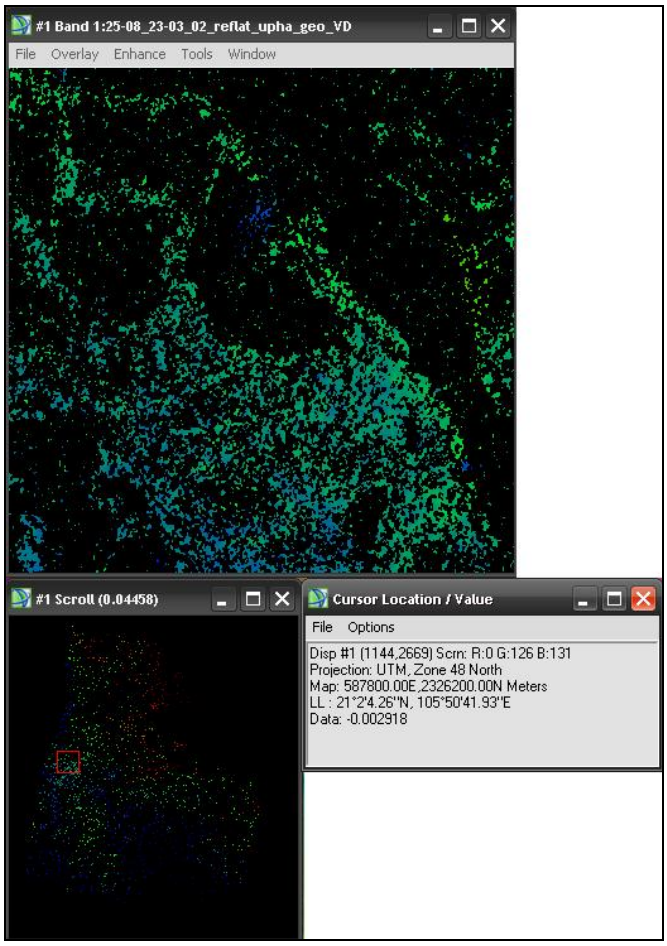


Figure 2.14 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati, filtré, déroulé, corrigé et géoréférencé (_upha_VD) (couple 2). On aperçoit plus du tout de franges mais quelques nuances (exprimées par des teintes différentes) signifiant peut être un changement d'altitude vertical de ces pixels.

- Pour le MNT, la réalisation d'un extrait de meilleure résolution aurait été optimale :

  - A partir du couple d'images disponible à un jour d'intervalle, mais ce fut impossible car pour avoir une vision stéréoscopique (la base de la vision en relief), il faut une base interférométrique de plus de 100 m, or la base ici est de 16 m, nettement insuffisant.
  - Par digitalisation des courbes de niveau et de points cotés des cartes ci-dessous mais ce fut impossible du fait de la faible densité de ceux-ci.
  - Via la stéréographie de photos aériennes, que l'on ne possédait pas.

2.2 Données

Il s'avère que d'autres images ERS étaient disponibles auprès de l'ESA[27](17 et 18/03/1996, 09/09/1996 et RADARSAT : 03/08/1996 et 01/12/1996. Peut être serait il bon d'en faire l'acquisition pour la continuité potentielle de l'étude.

2.3 Tester la technique sur d'autres images : Hô Chi Minh Ville

Nous avions en notre possession un couple d'images ERS et un couple ASAR à tester (voir tableau 2.4). Malheureusement, le couple ASAR possédait une ligne de base supérieure à la ligne de base critique et le couple ERS s'avère très bruité également (voir figure 2.18). Aucun résultat probant n'a donc pu être obtenu.

2.4 Tester la technique des réflecteurs permanents

Au vu des résultats, l'idée de faire un masque sur base des images de cohérence est apparue. La binarisation de celles-ci va simplement permettre de mettre en évidence les cellules dont la valeur du coefficient de cohérence est au-dessus ou en dessous du seuil de 0.5 (choisi car c'est la médiane du panel de valeurs possibles pour le coefficient). En effet, les premiers seront codés 1 (blanc) et les autres, 0 (voir figure 2.19). Ensuite, la superposition (via la fonction Band_Math) des masques créés a permis de mettre en évidence la série de pixels considérés comme « réflecteurs permanents », puisqu'ayant, au travers des trois masques, toujours une valeur au moins égale à la valeur médiane de cohérence. En géoréférençant l'image résultant de la superposition des masques avec une d'amplitude géocodée dans ERDAS Imagine 9.1, on peut tout à fait restituer les coordonnées terrain de ces capteurs et les identifier sur une image optique haute résolution (voir figure 2.20). Il existe donc une série de réflecteurs (3 088 sur la totalité de l'image) qui ont conservé une valeur de cohérence supérieure ou égale à 0.5 de l'année 1996 (année de l'image maîtresse du couple 1) à 2000 (image esclave du couple 3), et qui peuvent donc être considérés comme permanents, comme les ponts par exemple (cadre du milieu de la figure). Cela permet également d'éliminer une série d'éléments qui ne sont pas du tout réfléchissants, tels que la piste d'aviation (cadre à l'extrême est de la figure) ou la place d'Hô Chi Minh (cadre à l'extrême ouest).

[27] ESA : European Spatial Agency

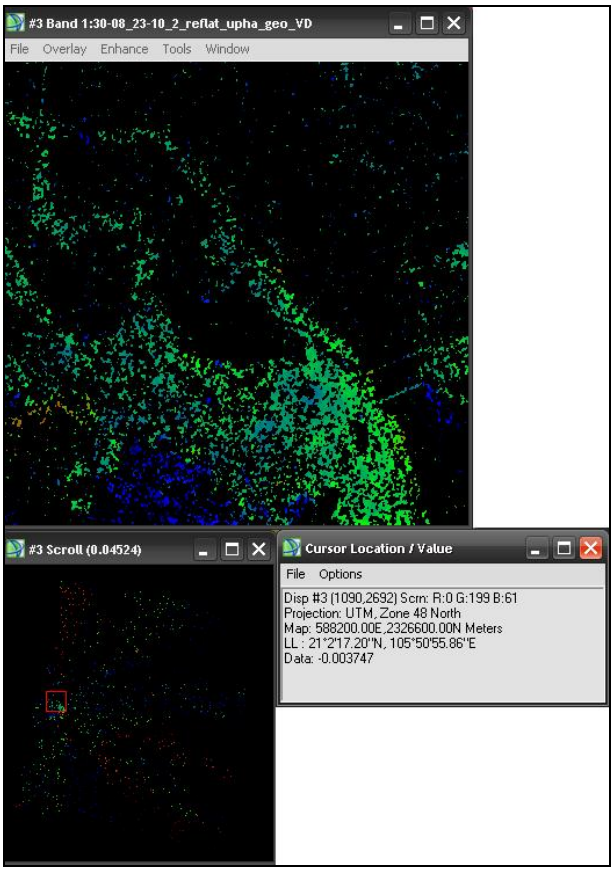


Figure 2.15 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati, filtré, déroulé, corrigé et géoréférencé (_upha_VD) (couple 3). On n'aperçoit plus aucune de franges mais quelques nuances (exprimées par des teintes différentes) signifiant peut-être un changement vertical d'altitude de ces pixels.

Reclassification	Ancienne valeur en m
0	NaN
1	[0 - 10[
2	[-10 - 0[

Tableau 2.3 : Table de reclassification des valeurs des images finales

La littérature s'est intéressée à cette option. Les problèmes liés à la décorrélation temporelle et géométrique interdisent une surveillance précise sur le long terme des déformations du sol. Une technique de traitement des interférogrammes basée sur la détection de pixels stables sur le long terme (spatialement et temporellement) et quelle que soit la ligne de base, en se basant sur la cohérence, permettrait de s'affranchir de ces désagréments. L'utilisation de ces pixels, appelés Réflecteurs Permanents (RP) permet de soustraire les effets de la troposphère puis de calculer des MNT de résolution de l'ordre du mètre et d'estimer la déformation avec la précision du millimètre. La notion de Réflecteur Permanent (RP) a été présentée pour la première fois par une équipe du Politectinico di Milano (Polimi) en 1999 par Ferretti. Nous savons qu'il peut s'agir d'un objet nettement plus petit que la taille du pixel (par exemple le coin d'un immeuble), mais la connaissance de la nature exacte des réflecteurs sur le terrain reste une question assez ouverte (toit bien orienté, plaque de signalisation, etc.). Les RP renvoient un signal fort (amplitude élevée) et sont peu bruités (phase stable).

En outre, s'ils sont suffisamment proches l'un de l'autre, ils enregistrent la même composante atmosphérique et le même déplacement. Dans ce cas, il devient possible de séparer les différentes contributions de la phase. D'après Ferretti, un "seuillage" des cartes de cohérence pourrait suffire à l'identification des RP (ce que nous avons fait dans un premier temps). Cependant, si l'on considère que, d'une part, la compensation topographique est imparfaite (et ce en raison de la résolution du MNT), et que, d'autre part, l'utilisation d'interférogrammes à grande ligne de base augmente la dispersion de la phase, la cohérence est très probablement sous-estimée. C'est pourquoi la proposition d'utiliser une méthode de sélection basée sur l'évolution temporelle de l'amplitude (D_A : dispersion de l'amplitude) du signal est développée, cette dernière n'étant pas affectée par les effets de l'atmosphère et de la topographie (voir Van Gorp, 2003 pour un complément d'information). Une fois la sélection des RP effectuée, et donc le taux de déplacement connu pour ces points, la restitution de cette valeur pour l'ensemble de la scène va s'effectuer sur base de l'estimation d'un semi-variogramme (supposé isotropique) sur lequel on applique un modèle de déformation linéaire et un algorithme d'interpolation du genre krigeage (Worawattanameteekul *et al*., 2004). Ensuite, la restitution du taux régional de subsidence peut se faire sous forme d'isolignes pour une meilleure compréhension du phénomène. Il faut noter que le taux de déformation estimé par cette méthode n'est pas strictement celle du sol, en cause, la nature elle-même des RP qui sont souvent des coins ou des toits d'immeubles ou d'autres structures de haute altitude.

Cette approche pourrait être tentée pour la suite de l'étude initiée ici.

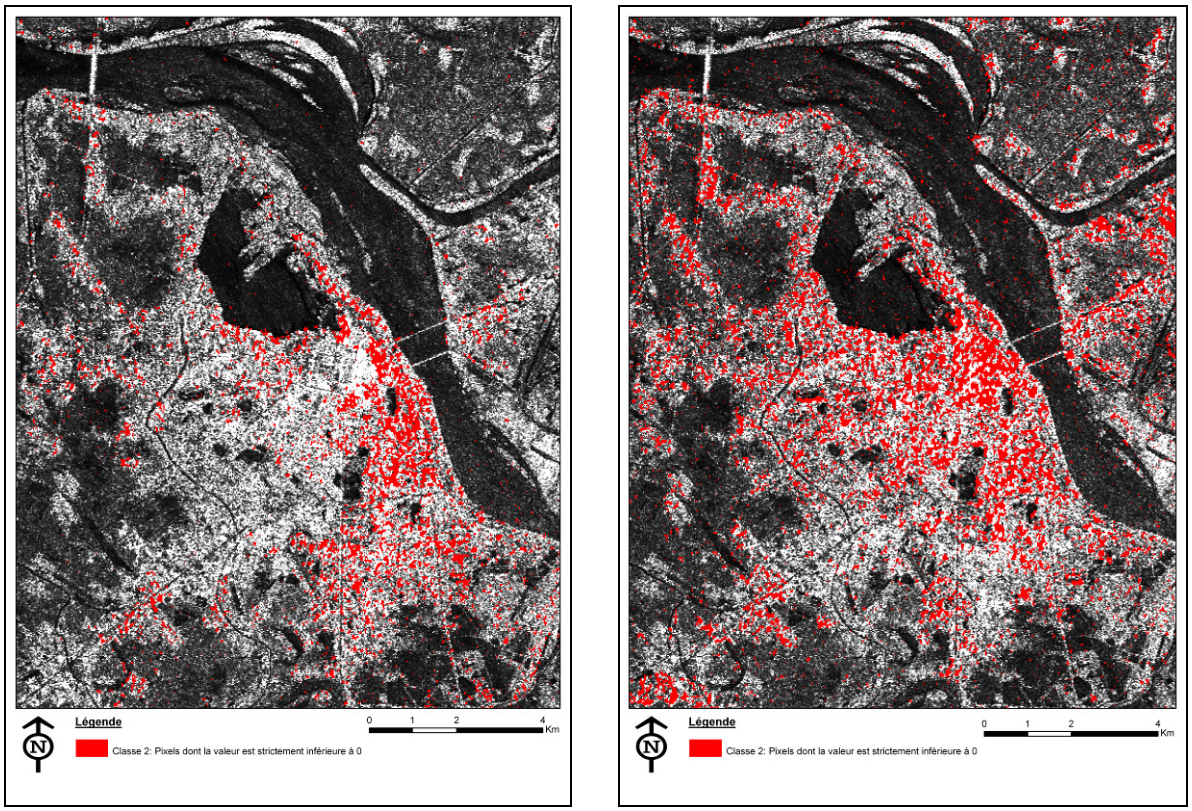


Figure 2.16 et 2.17 : L'image d'amplitude ERS géoréférencée en UTM 48 Q, WGS 84 du 30-08-1999 est superposée, à gauche au résultat de la classification de l'image finale du couple 2 (210 jours) et à droite à celui du couple 3 (420 jours).

Satellites	Date	ERS	Ascen-Desc	Heure GMT	Numéro Orbite
ERS-1/2	17/11/1998	2	Descending	3:18	18695
	15/02/2000	2	Descending	3:18	25208
ASAR	16/12/2003		Descending	2:48	9376
	8/06/2004		Descending	2:48	11881

Tableau 2.4 : Caractéristiques des images disponibles pour l'étude sur Hô Chi Minh Ville

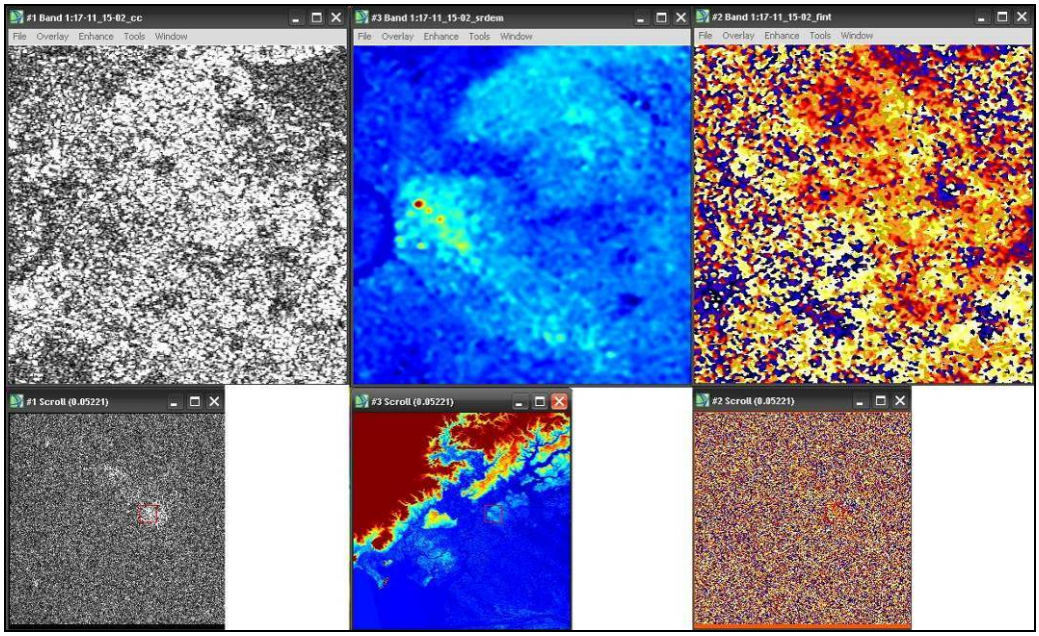


Figure 2.18 : Tentative, vaine, de sélection des GCP en parallèle sur une image de cohérence (_cc), de relevé de terrain selon la ligne de visée (_srdem) et l'interférogramme filtré (_fint) du couple sur HCMC.

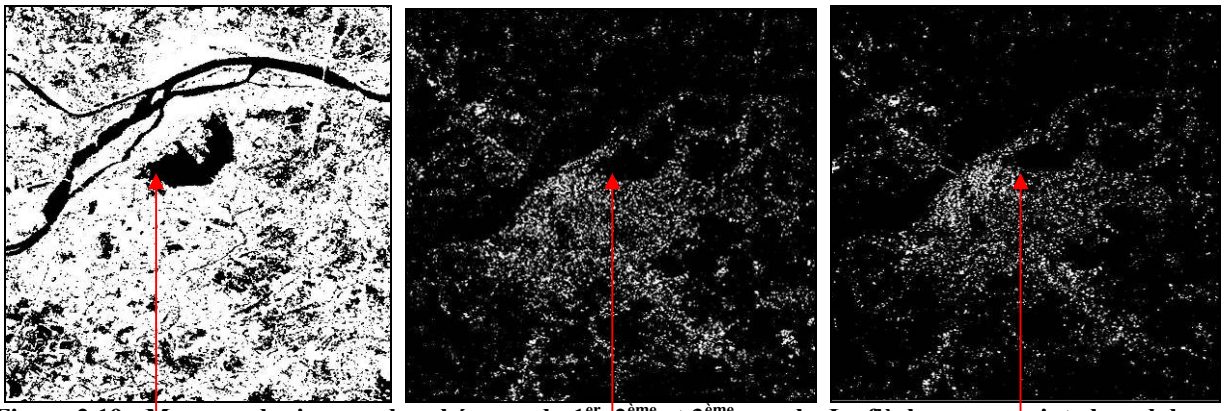


Figure 2.19 : Masques des images de cohérence du 1er, 2ème et 3ème couple. La flèche rouge pointe le sud du lac de l'Ouest.

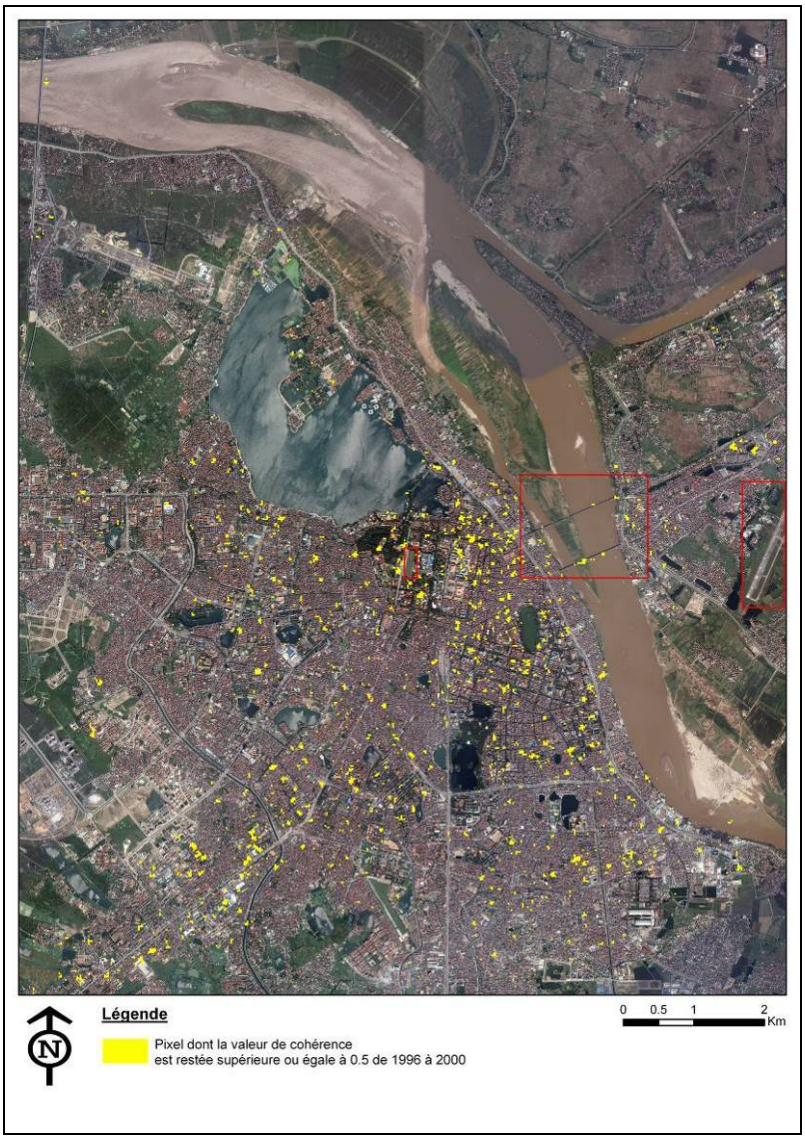


Figure 2.20 : Réflecteurs permanents (en jaune, résultat de la fusion des trois masques) superposés à l'image Google Earth de 2003 géoréférencée en UTM 48 Q, WGS 84.

Partie 3. Inondations, un risque accru par la subsidence ?

Récurrence	Débit (m³/s)
1,0%	37600
0,5%	41300 -41500
0,4%	42000 -42600
0,3%	44200 - 45000
0,2%	48000 - 48500
0,1%	51000 - 51700

Tableau 3.1 : Caractéristiques des crues du Fleuve Rouge (Nghia et Chau, 2002)

Dates	Elévation du niveau du fleuve (m)	Débit (m³)	Station
Août 1945	14,43	34250	Son Tay
		21000	Hoa Binh
Août 1969	13,66	28900	Son Tay
		15800	Hoa Binh
Août 1971	14,82	37800	Son Tay
		16200	Hoa Binh
Août 1996	13,46	27200	Son Tay
		22600	Hoa Binh

Tableau 3.2 : Dates et caractéristiques des inondations les plus « marquantes » (Nghia et Chau, 2002) mesurées en station.

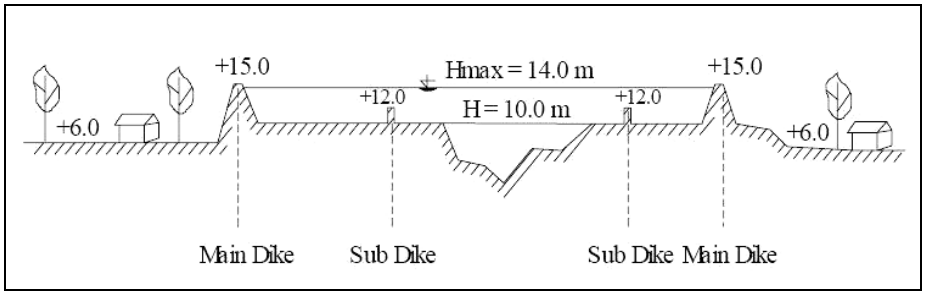


Figure 3.1 : Transect de la ville au niveau du pont Long Bien (Tinh *et al.*, 2005)

Figure 3.2 : Digue surélevée par rapport à la ville (les deux lignes symbolisent les deux niveaux : digue et ville) (Photographie A. NOEL, 20-03-2008)

Le risque d'inondation est une composition d'un élément aléatoire hydro-météorologique (la crue du fleuve) et d'un élément socio-économique (la vulnérabilité de l'occupation du sol à la présence d'eau), ces deux éléments étant spatialisés et variables dans le temps (Gilard, 2006).

A. Risque d'inondation

1. L'aléa

Au Vietnam, il y a des catastrophes typiques pour chaque saison et en fonction des particularités des régions. Dans la région du delta du Fleuve Rouge, le risque d'inondation est directement lié aux crues du cours d'eau (voir tableau 3.1). Celles-ci ont lieu chaque année entre les mois d'août et novembre, légèrement décalées par rapport au pic pluviométrique. Les crues conservent un niveau d'eau, généralement de l'ordre de 4 à 8 m au-dessus du niveau normal (Tinh *et al.,* 2003), durant 6 à 10 jours (Nguyen, 2006). Néanmoins, certaines crues sont plus impressionnantes que d'autres (voir tableau 3.2).

La majorité des Vietnamiens ont exploité les basses plaines côtières, sujettes aux inondations, pour l'agriculture du riz humide. Mais ils ont adapté leur culture à ces événements au fil des siècles. Le problème s'est multiplié ces dernières années avec un grand nombre de changements comme la dégradation environnementale durant la guerre, l'accroissement rapide de la population et la dégradation du système existant de digues (Hansson et Ekenberg, 2001).

1.1 Cause d'inondation

1.1.1 La topographie plane

Le drainage de Hanoi est particulièrement difficile en raison de sa situation au milieu d'un delta (qui, par nature géomorphologique, est une zone inondable) et de sa topographie par rapport au fleuve. L'altitude de la ville se situe entre 4,5 et 11 m (6 m en moyenne) avec une pente de l'ordre de 0,3% du nord au sud, alors que le fleuve est à une altitude moyenne de 8 m (voir figure 3.1 et suivante).

La différence d'altitude entre la partie aval de la ville et le fleuve est très faible. Ceci a une conséquence non négligeable : les quartiers du S.-O. sont très touchés par les inondations (et donc moins développés) car les eaux pluviales s'y dirigent prioritairement.

1.1.2 Le remblaiement des lacs et des étangs et le pavement des zones basses

Les étangs et les lacs ont été asséchés intentionnellement par les développeurs pour la construction d'immeubles d'habitation ou de bureaux, de grands axes de circulation (voir figure 3.3) et aussi involontairement par le dépôt de toutes sortes de déchets. A coté de cela, la plupart des sols nus et des pelouses ont été pavés et puis construits. L'ensemble de ces actions signifie la réduction de la capacité des sols d'absorber les pluies et de drainer les eaux jusqu'au fleuve et ses tributaires (Timmermanab et White, 1997).

Figure 3.3 : A gauche, lac asséché avec une pompe en avant plan (13-03-2008) et à droite, immeuble de résidence bâti sur un lac encore en voie d'assèchement (14-03-2008)(Photographie A.NOEL)

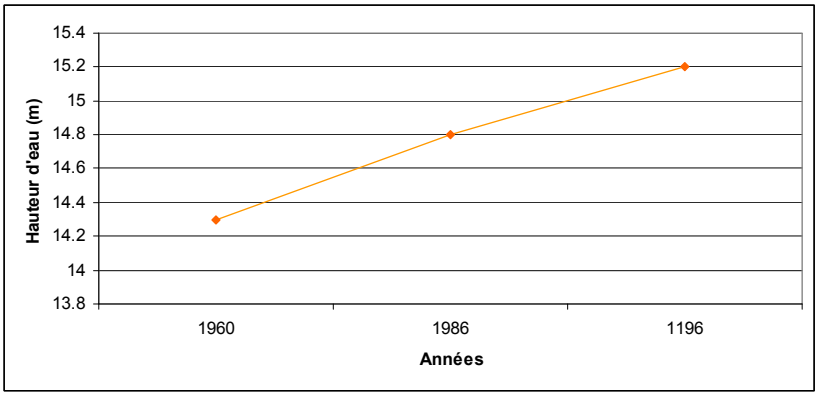


Figure 3.4 : Hausse du lit du fleuve entre les années 1960 et 1996 pour un débit de 20 000 m³ à Son Tay (Speech, 2002)

Figure 3.5 : Exploitation du sable du lit du fleuve (Photographie A.NOEL, 13-03-2008)

▲ La pression hydrologique est donc transférée entièrement sur les digues, alors que celles-ci sont dans un piteux état.

1.1.3 L'augmentation de la charge solide dans le fleuve

Avec l'augmentation des surfaces cultivées, le déboisement augmente et avec lui, l'érosion des sols due à la pluie. Ce phénomène met en suspension une importante charge solide dans le fleuve. Ces sédiments contribuent donc à l'envasement des ouvrages d'art (Gilard, 2006) mais également au rehaussement du lit du fleuve (et donc implique une surélévation successive des digues) (voir figure 3.4). Ce dernier effet est momentanément réduit par l'extraction de volumes considérables d'alluvions dans le lit du Fleuve Rouge (voir figure 3.5) utilisés comme matériaux de construction.

▲ Cette exploitation a également tendance à accélérer l'érosion et à fragiliser les berges et, parfois, les endiguements eux-mêmes (Gilard, 2006).

1.1.4 L'insuffisance et le mauvais entretien des infrastructures de la ville (canaux de drainage et digues)

Pendant la guerre, les infrastructures ont été négligées et les industries se sont installées sans égard ni pour l'environnement, ni pour les structures mises en place (Timmermanab et White, 1997). Beaucoup de sections du système de digues et de canaux sont réparées sommairement et, durant la saison humide, la charge caillouteuse et sableuse érode et des fissures apparaissent. Le système apparaît ne pas être assez robuste ni fiable pour tous les types de flux (Dutta *et al.*, 2005) (voir figure 3.6). Les conduites sont également colmatées par les déchets (les « restos », qui s'installent sur le trottoir, une fois le repas terminé, déposent les restes dans une rigole, qui s'obstrue).

1.1.5 L'isolement hydraulique en casier

L'endiguement systématique (voir figure 3.9) augmente fortement la contrainte hydraulique en termes de hauteur d'eau de crue car il réduit le stockage de l'eau dans des zones d'inondation, ce qui amène à encore surélever les digues.
Ensuite, ils ont aussi pour effet de concentrer les dépôts de limons, entraînant un exhaussement du lit des rivières par rapport à la plaine environnante (voir A.1.1.3 et figure 3.1 ci-dessus).

1.1.6 La pollution et le réchauffement climatique

La pollution, due au grand nombre de motocycles et autres véhicules en tous genres ainsi qu'aux industries, engendre un réchauffement de l'ensemble de la ville. Cet air chaud ascendant provoque l'apparition de nuages et, ensuite, de pluies (Tinh *et al.*, 2005), s'ajoutant aux précipitations déjà présentes.

Les changements climatiques vont exacerber cette situation précaire : d'une part, avec l'élévation du niveau des océans, le gradient de la rivière va diminuer et d'autre part, l'intensité des pluies va augmenter (Timmermanab et White, 1997).

Figure 3.6 : « Canaux d'égouttage » servant également à la dérivation des flux en cas de crue (Photographie A.NOEL, 13 et 16-03-2008)

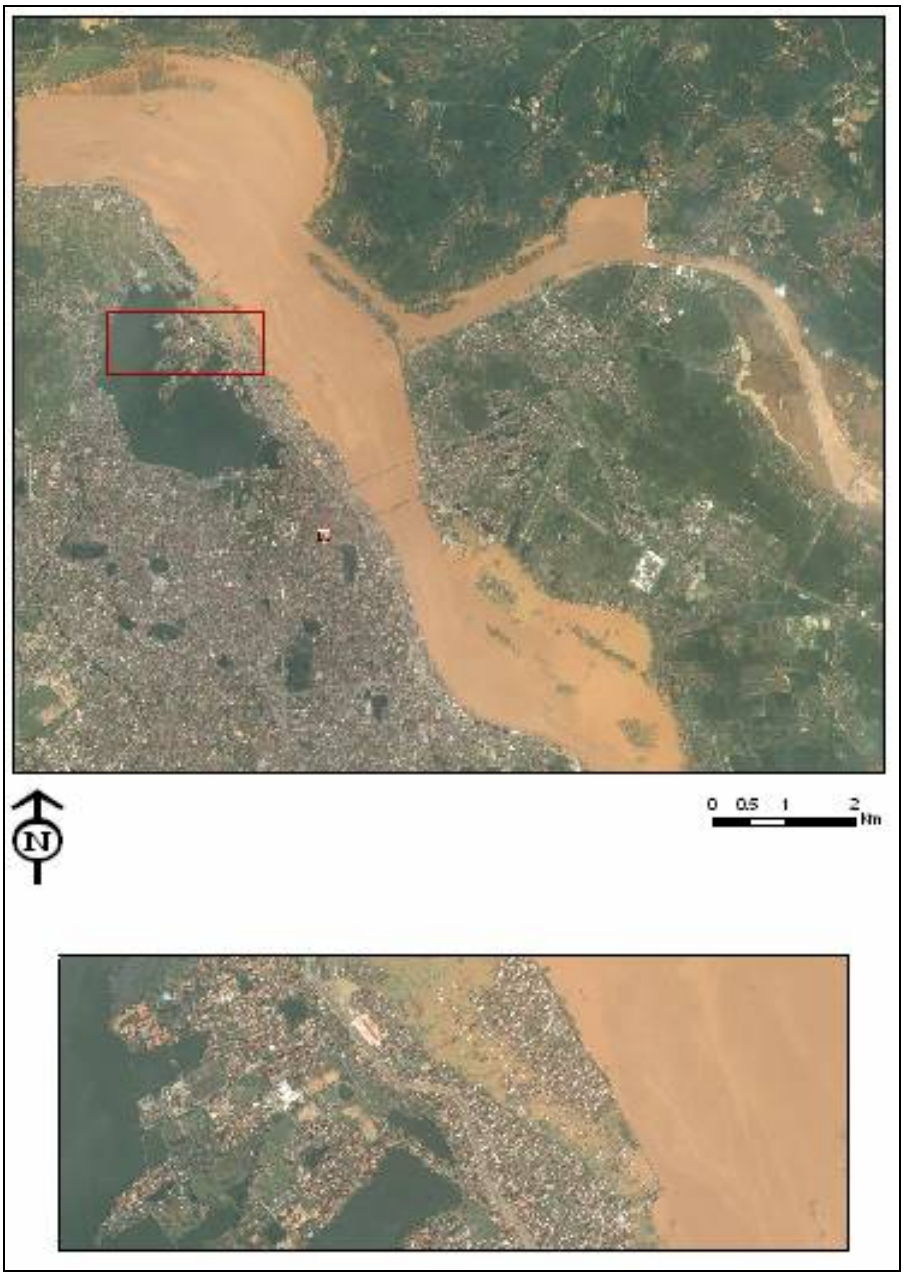


Figure 3.7 : Image Quickbird du 04-08-2004 (http://mapsLive.com) d'une crue du Fleuve Rouge. Sur l'image du bas, on distingue les quartiers entiers qui sont inondés car ils sont situés en avant de la digue.

1.2 Types d'inondation

1.2.1 Par débordement au-dessus des digues ou passage au travers de brèches

Historiquement, les digues ont cédé durant les inondations de 1945 et de 1971 mais, même après les bombardements dus à la guerre, elles n'ont jamais rompu **dans** la ville. Ces inondations ont provoqué la submersion de vastes zones réputées protégées, causant d'importants dégâts matériels. Mais les espaces affectés par ces deux inondations diffèrent considérablement en localisation et superficie, ce qui explique le caractère tout à fait imprévisible des ruptures de digues (Gilard, 2006). Les deux crues historiques de 1945 et de 1971 dans la ville n'ont pas été provoquées par une brèche mais par un débordement des endiguements existants. Quant à celle de 2001, elle a dépassé plusieurs semaines d'affilée la cote d'alerte au niveau de la traversée de Hanoi (voir figure 3.7).

1.2.2 Par débordement des canaux de drainage

1.2.3 Par débordement des bassins de rétention et par remontée phréatique

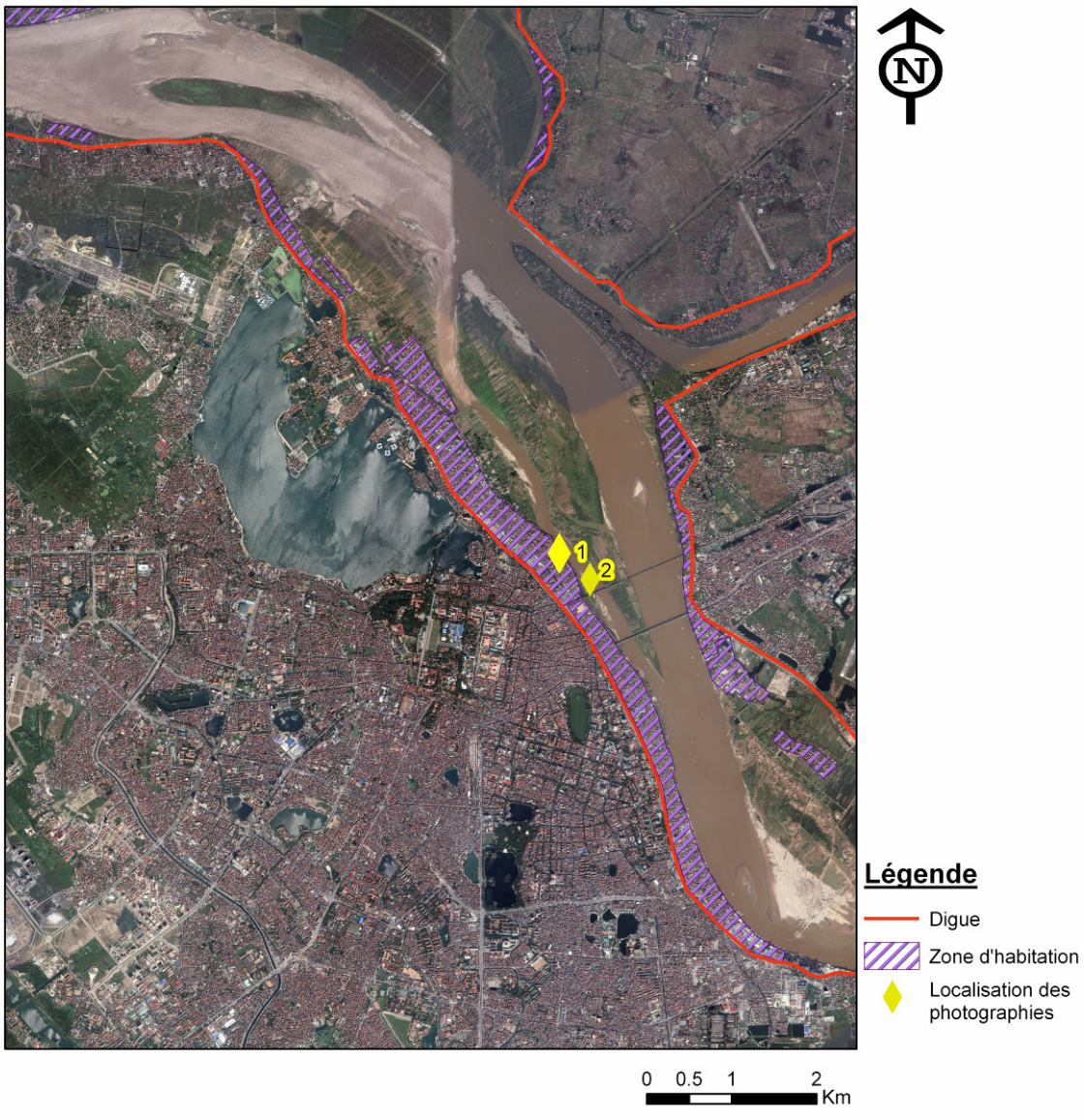
2. Vulnérabilité

C'est une notion indépendante de la réalité de l'aléa (c'est-à-dire de la probabilité de cette inondation) à caractère socio-économique intégrant un niveau d'acceptabilité sociale et financière de l'occurrence de dégâts d'une ampleur donnée (situation viable et risque acceptable) (Gilard, 2006).

2.1 Un grand nombre de facteurs accroît la vulnérabilité

2.1.1 La construction sur les berges non protégées

Hanoi est actuellement une ville surpeuplée. Dans le quartier traditionnel des 36 rues, on compte un espace vital de 2 m² par habitant. Juste avant l'ouverture économique de la fin des années 1980, la construction des logements s'est effondrée faute de financements publics. Depuis lors, les constructions privées ont pris le relais, mais le plus souvent d'une façon accélérée, désordonnée sinon illicite. Les gens s'installent notamment en avant des digues, à même les berges de la rivière (voir figure 3.8), dans des zones qui sont inondées au cours de la saison humide. Selon les habitants, cela présente quelques avantages : le prix bas du terrain, l'air frais et la proximité du centre-ville et deux désavantages : les crues comme inconvénient et le manque de facilités publiques (Hung *et al.,* 2005).



1. Habitations au bord de la berge en rive droite du fleuve

2. Laisses de crue sur le mur de briques (végétation) et sur le mur lisse (trace du niveau d'eau)

Figure 3.8 : Carte schématique mettant en évidence l'importance du nombre de constructions édifiées à même les berges et la photographie montre les stigmates d'une inondation (Fond de carte Google Earth, 2003 et photographies A.NOEL le 13-03-2008)

2.1.2 Changement de l'occupation des sols

Avec l'accélération du développement économique se dessine, sans doute, un profond bouleversement de l'occupation des sols dans le delta. L'incidence de ce changement d'usage des sols pourrait avoir des conséquences désastreuses, notamment en termes économiques, en cas de grande crue du fleuve au vu des investissements en jeu (Gilard, 2006).

2.1.3 Augmentation des capitaux mobilisés

La population se cache derrière un faux sentiment de sécurité, chacun ayant l'illusion que le réseau de digues suffit à protéger le delta de toute catastrophe naturelle (Gilard, 2006), ainsi poussée à la consommation et à l'achat de biens. Suite à une enquête : 48.9% de la population interrogée ne croit pas qu'un événement comme celui de 1971 puisse se reproduire dans les prochaines 70 années (Hansson et Ekenberg, 2001).

2.2 Conséquences

Lorsqu'une inondation touche une grande partie de la population, plusieurs conséquences rendent la catastrophe encore plus sévère : le manque de nourriture et d'eau potable les perturbations affectant le tourisme, les risques sanitaires, les problèmes de logement, la désorganisation de la vie quotidienne[28](pêche et agriculture), les coûts de nettoyage, la pollution stagnante dans les rues. Souvent, les capitaux endommagés ne sont pas remplacés, les projets de développement sont interrompus et la pauvreté aggravée (Hansson et Ekenberg, 2001).

3. Lutte contre les inondations

Bien que beaucoup de mesures structurelles soient installées en amont du fleuve, le risque d'une catastrophe à Hanoi due aux pluies extrêmes est bas (comme on va le voir ci-dessous) mais il ne peut être ignoré. (Dutta *et al.*, 2005). L'utilisation de cet espace par l'activité humaine doit intégrer cette certitude comme une contrainte et prendre des mesures qui permettent de la rendre acceptable. L'homme ne peut prétendre supprimer le risque, juste minimiser l'aléa (Gilard, 2006). Ainsi diverses stratégies de mitigation[29] sont mises en place.

3.1 Protections existantes

3.1.1 Lacs et étangs

Le système d'assainissement et de drainage des eaux pluviales repose d'une part sur les deux cours d'eau que sont le To Lich et le Nhuê et d'autre part sur la série de lacs et d'étangs (artificiels pour l'extraction de la glaise ou naturels suite aux divagations du fleuve) qui jalonnent ces rivières et leurs affluents. Durant les fortes averses, les eaux pluviales sont stockées dans les lacs et dans les étangs en attendant la baisse des eaux des rivières pour s'y déverser.

[28] http://academie.oieau.fr/academie/membres/phanoi.htm
[29] Mitigation : atténuation en matière de prévention des risques naturels. Il s'agit d'atténuer les dommages sur les enjeux pour les rendre plus supportables par la société.

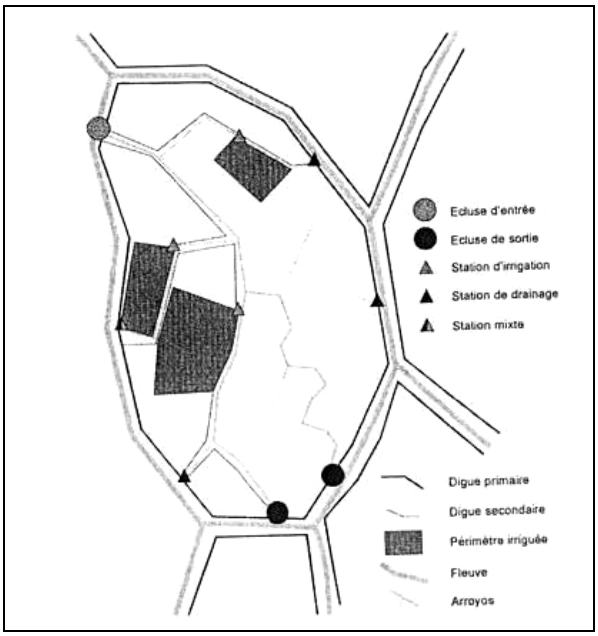


Figure 3.9 : Casier (Fontenelle, 2006)

Dates	Niveau d'eau (m)	Elévation de la digue (m)
1915	10,7	11,2
1920	11,0	11,5
1923	11,5	12,0
1932	12,0	13,3
1960	13,0	14,3
1963	13,3	14,6
1966 - 1977	13,6	15,1

Tableau 3.3 : Evolution du niveau de la digue avec le niveau de la surface du cours d'eau

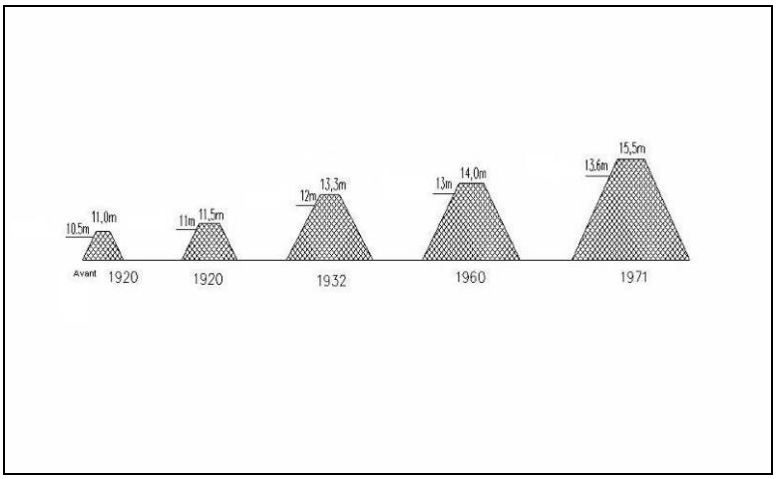


Figure 3.10: Elévation du cours d'eau et des digues Nghia et Chau, 2002

Ils régularisent le système hydraulique et réduisent la fréquence et la sévérité des inondations.

3.1.2 Chenaux

La rivière Nhuê est l'axe de drainage principal. Deux bras défluents peuvent être également utilisés pour décharger une partie de l'eau en amont de la ville et la diriger vers d'autres secteurs du delta : la rivière Day et la rivière Duong.

3.1.3 Digues

La gestion de l'eau au sein de ces espaces poursuit un double objectif partiellement contradictoire : éviter le surplus d'eau en période de hautes-eaux et assurer un apport d'eau suffisant pour la mise en valeur agricole en période de basses-eaux (Gilard, 2006). Le bassin versant est divisé en trente casiers hydrauliques primaires qui fonctionnent comme autant de bassins versants artificiels, indépendants les uns des autres en matière de protection, d'accès et d'évacuation des eaux avec une écluse principale d'accès à l'eau du fleuve et une ou plusieurs écluses de drainage situées à l'aval. Les écluses sont connectées via un réseau de chenaux naturels et artificiels au sein duquel l'eau circule par gravité. Durant la mousson d'été, l'écluse d'entrée est fermée et les chenaux servent de drains qui collectent les eaux de ruissellement des rizières, ceux-ci étant vidés par gravité ou par pompage grâce aux stations de drainage. En dehors de la période humide, l'écluse principale est ouverte, les chenaux servent de réservoirs dans lesquels les stations de pompage prélèvent de l'eau pour l'irrigation (Fontenelle, 2006) (voir Figure 3.9).

3.1.4 Vérification par des experts de l'état des digues

Il convient de vérifier fréquemment et consciencieusement l'état et le comportement des digues et de déclencher d'éventuelles alertes en cas de signes d'affaiblissement (infiltration, érosion) pouvant conduire à un risque de rupture.

3.2 Solutions structurelles

Carte générale (voir figure 3.11)

3.2.1 Rehaussement et renforcement des digues

Le système de digues a été amélioré d'année en année, spécialement après les inondations de 1971 (voir figure 3.10 et tableau 3.3). La réhabilitation (traitement des fondations) et la consolidation (la route nationale a été redimensionnée) de la grande digue de Hanoi (45 km, jusqu'à Hatay), entre 1993 et 2001, ont été financées par la BAD du Vietnam, et l'ACDI[30].

[30] BAD : Banque Asiatique de développement ; ACDI : Agence Canadienne de Développement International

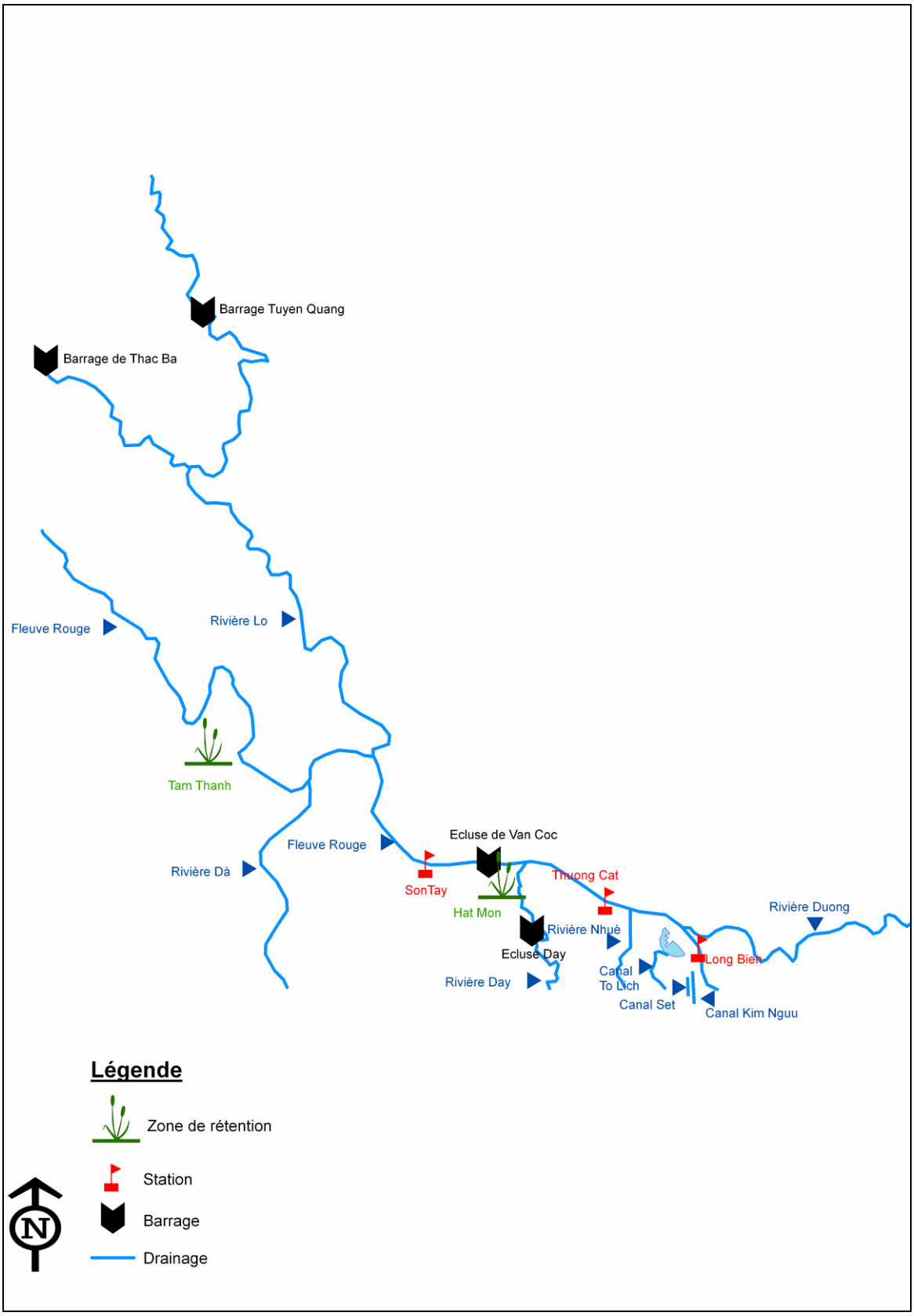


Figure 3.11 : Schéma non exhaustif des solutions structurelles mises en place dans la lutte contre les inondations (sur base de la carte topographique (F-48-11) au 1/250.000 de 1954 et des éléments des articles ci-dessus cités)

▲ Elargir les digues devient de plus en plus difficile puisque les terrains aux alentours sont occupés et chers (Tinh *et al.*, 2003). En outre, à plusieurs endroits, cette digue est volontairement discontinue pour permettre le passage aux habitants des berges (voir figure 3.12).

3.2.2 Réservoirs de barrages en amont

Ces réservoirs sont « multi-usages » : ils servent de réserve d'eau pour centrale électrique et d'écrêteurs de crues (voir tableau 3.4). D'un point de vue écologique, ils ne constituent plus la solution car ils détruisent les écosystèmes. Les écluses comme celles de Van Coc (26 portes) ou de Day Dam (6 portes) pourraient représenter une solution alternative.

3.2.3 Dérive des flux, canaux de diversion des flux

Diversion des flux dans la rivière Day (accepte jusqu'à 5 000 m³/s) et au sein d'autres de calibre moindre en cas d'extrême besoin (voir figure 3.11).

3.2.4 Bassins de rétention et zone de stockage

Le concept réside dans le choix, par le biais d'aménagements, de zones d'épandage des crues exceptionnelles plutôt que de laisser le hasard et les ruptures de digues spontanées « décider » de ces zones. Mais cette stratégie se heurte aux choix politiques et au syndrome du Nimby (« *Not in my backyard :* Pas dans mon jardin »). Elle doit donc être suivie par des interventions de haut niveau et faire l'objet de compensations (fonds d'indemnisation et infrastructures adaptées pour les zones « en danger ») (voir figure 3.11).

3.2.5 Reforestation et protection des forêts du bassin versant

3.2.6 Dragage du lit

Pour accélérer le passage du flux, il est nécessaire de nettoyer les obstacles, de supprimer les travaux de construction non conformes et de prélever les sédiments dans la rivière (Tinh *et al.*, 2003).

3.3 Solutions non structurelles

Une stratégie fondée uniquement sur les mesures structurelles n'est pas une option réaliste puisque les coûts de la maintenance s'accroissent constamment, et que les pertes s'aggravent du fait d'une population toujours plus dense (Hansson et Ekenberg, 2001).

3.3.1 Modélisation et prédiction

Pour prédire le niveau d'eau et le débit à Hanoi, un modèle hydrologique a été développé pour le système hydraulique Fleuve Rouge – Thai Binh (Diep *et al.*, SD) : FLOCODS. Une carte des inondations pourrait également être élaborée sur base de documents photographiques pour représenter les deux composantes du risque que sont l'aléa et la vulnérabilité et les comparer.

Réservoir	Capacité (milliards de m³)	Débit écrêté (milliards de m³/s)	Capacité installée (MW)	Hauteur (m)
Thac Ba	2,2	0,5	120	60
Hoa Binh	9,5	4,9	1920	115
Dai Thi	2,1	1,7	313	115
Son La	25,0	10,0	3600	265

Tableau 3.4 : Principaux barrages et leurs caractéristiques

Figure 3.12 : Digue discontinue (Photographie A.NOEL 13-03-2008)

3.3.2 Améliorer les standards de sécurité (d'après Nguyen, 2006)

Les mesures concernent

- D'une part, l'aide d'urgence: préparer les dispositifs de secours, les équipements et les nécessités (Tinh *et al.*, 2003).
- D'autre part, préventivement, tout ce qui se rattache aux habitations : interdire la construction en zones inondables, élaborer de nouveaux codes de construction (en prévoyant l'existence d'un second étage par exemple) peut diminuer l'impact de l'aléa.

3.3.3 Changement des perceptions des communautés

L'éducation du public et la sensibilisation aux risques reste la meilleure option pour accroître sa préparation en ce qui concerne les risques d'inondations catastrophiques. La compréhension scientifique détaillée de la zone et la disponibilité des experts optimalisent la prévention.
Evidemment, l'existence d'un système d'alerte précoce et de lignes effectives de communication reste obligatoire pour la diffusion des règles de prévention et d'action en cas d'inondations.
La diversification de la production pour réduire l'impact sur l'économie domestique, si une ligne de production est défaillante, peut également être une solution à la diminution de la vulnérabilité.

Beaucoup des facteurs énoncés ci-dessus peuvent expliquer le fait que les pays les moins développés sont plus vulnérables que les pays industrialisés. La pauvreté elle-même contribue à l'accroissement de la vulnérabilité (Hansson et Ekenberg, 2001).

3.3.4 Coopération

La collaboration au travers des frontières améliorerait peut-être la gestion des ressources naturelles pour le bénéfice de tous les intervenants à différents niveaux (Hansson et Ekenberg, 2001).

3.3.5 Fonds communs et assurances

Les assurances sont virtuellement inexistantes alors qu'elles sont une solution pour transférer la responsabilité au public (tierce partie) et peut aider le pays à financer les pertes dues aux risques naturels et à réduire la dépendance auprès des prêteurs (Hansson et Ekenberg, 2001).

3.4 Lacunes de gestion

La gestion des écoulements du Fleuve Rouge est relativement complexe due au fait que la structure organisationnelle n'est pas du tout coordonnée (se reporter à l'article de Nguyen, 2006). La dispersion des responsabilités entre diverses administrations rend difficile l'application des méthodes d'analyse du risque.

Figure 3.13 : Influence de la subsidence sur les ouvrages d'art, à gauche un mur de canal et à droite un pont en « altitude » (Photographie A.NOEL, 13-03-2008)

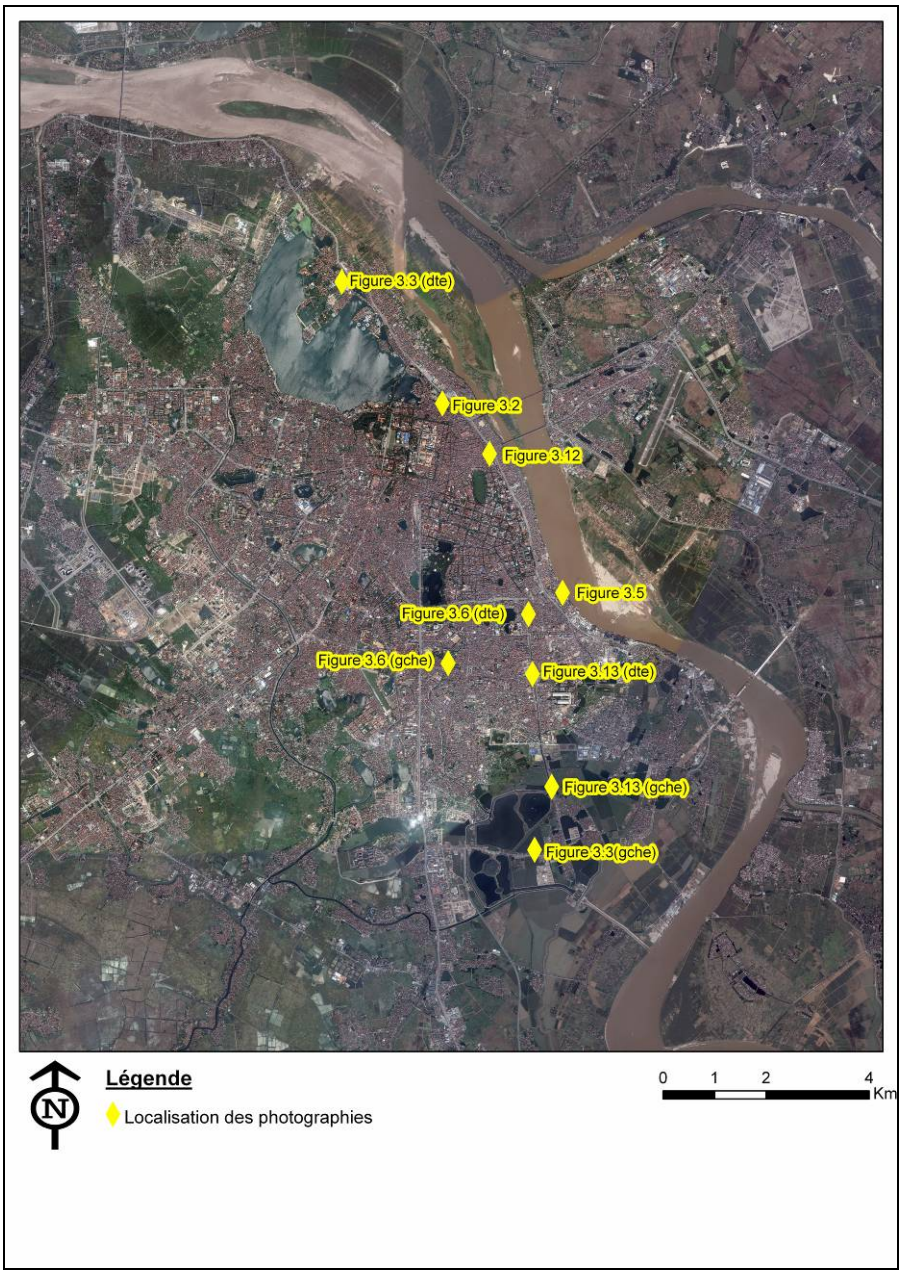


Figure 3.14 : Localisation des diverses photographies présentées ci-dessus.

La nécessaire coopération pluri-institutionnelle (entre comités et entre niveaux décisionnels) et technique a imposé la mise en place d'une nouvelle loi sur l'eau en 1999, posant les bases d'une organisation par bassin et créant une structure de concertation entre les différents acteurs dans un seul comité de gestion.

Face à l'aggravation des risques, les responsables politiques peuvent également trouver un soutien de la part de la Banque Mondiale, celle-ci s'étant associée avec la Stratégie internationale des Nations Unies pour la prévention des catastrophes et au Dispositif mondial de réduction des effets des catastrophes et de reconstruction en 2008 afin de publier un rapport sur la vulnérabilité des grandes villes asiatiques.

La spéculation foncière existe autour des changements d'usage des sols. Ces enjeux financiers ont forcément des conséquences sur les processus de décisions de l'occupation de l'espace. Une planification urbaine (Plan 2020) est nécessaire pour rationaliser les efforts de rénovation et de modernisation tout en respectant l'héritage et le caractère qui font de Hanoi l'une des villes les plus séduisantes de la région.

B. Influence de la subsidence

1. Sur les digues

La ville existe uniquement par la présence de digues mais que dire si des parties de celles-ci sont en subsidence ? Cette dernière aura-t-elle une influence sur l'impact des inondations ? La question mérite d'être posée. En effet, nous avons précédemment pu remarquer que certaines zones de la capitale (celles du centre, près de lac d'Hoan Kiem et au sud) sont victimes d'un tassement et donc d'une baisse d'altitude.

A priori, cela ne pose pas de problème au vu de la hauteur des digues. Mais si les digues devaient subir les même sort, à savoir, perdre de l'ordre du centimètre de hauteur par année, que se passerait-il? Une modélisation de la subsidence (lorsque son taux annuel moyen et sa répartition pourront être estimés avec précision) couplée avec des références hydrologiques telles que les hauteurs d'eau pourrait répondre à cette question.

2. Sur les chenaux

La subsidence peut créer des ruptures de pente dans les chenaux d'irrigation et empêcher la bonne évacuation des eaux pluviales. En cas d'anisotropie, elle peut causer des déconnexions dans les conduites souterraines (d'égouttage ou de produits pétroliers) et libérer les fluides, occasionnant ainsi une éventuelle pollution des sols.

3. Sur les ouvrages d'art

Les tassements peuvent entraîner la déformation des voies de chemin de fer (pouvant perturber l'arrivée d'aide d'urgence par exemple) ou la fracturation et/ou déstabilisation des ponts (voir figure 3.13).

La subsidence accroît d'une part la probabilité d'inondation en provoquant l'abaissement du niveau des digues et d'autre part l'intensité de celle-ci en fragilisant les structures régulatrices des flux.

Conclusion

L'extraction extensive d'eau souterraine a été identifiée comme étant la cause principale de la subsidence d'une grande partie de la ville de Hanoi et sa périphérie. Pour éviter des dommages majeurs ou collatéraux provoqués par une subsidence de plus grande envergure, les différentes facettes du phénomène doivent être bien comprises. Des informations fiables et récentes sont indispensables pour développer cette compréhension. Conventionnellement, les techniques de mesure par nivellement ont toujours servi pour ce genre de phénomène, mais elles sont coûteuses en temps et onéreuses. L'interférométrie différentielle est un moyen alternatif pour évaluer de manière quantitative les déformations de surface, avec une meilleure résolution et une exactitude au moins semblable, tout en consommant moins de temps.

Nous avons appliqué la démarche traditionnelle d'interférométrie différentielle sur sept images ERS-1/2 (formant 21 couples) et quatre images ASAR (formant 6 couples) de la ville de Hanoi et nous avons réalisé les nombreux traitements nécessaires au processus interférométrique dans le logiciel ENVI. Malheureusement, du fait de la grande perte de cohérence qui existe parmi les couples d'images étudiés, peu de résultats probants ont pu être obtenus. Les raisons de cette faible cohérence peuvent être liées aux données : la mauvaise qualité des images, notamment du fait que la bande C de l'imageur ne soit pas forcément la mieux adaptée à une zone tropicale humide de delta (« garbage in → garbage out »), mais aussi éventuellement à une trop grande ligne de base, spatiale ou temporelle. La perte de cohérence se joue aussi au niveau de l'utilisation des paramètres par défaut lors des traitements des images, de la formulation d'hypothèses durant l'analyse ou du géoréférencement uniquement sur base du MNT du logiciel. Ces nombreux paramètres nécessaires au traitement des images ont également pu introduire toutes sortes d'imprécisions, rendant les résultats encore plus approximatifs, sans possibilité de calibrer les résultats obtenus.

Pour améliorer l'image interférométrique finale, la technique des réflecteurs permanents devrait être développée, pour réduire les artefacts et augmenter la précision des mesures de subsidence. L'utilisation d'images supplémentaires pourrait également constituer une alternative dans l'optique de disposer de couples de meilleure qualité.

Néanmoins, une approximation sur les emplacements de terrains en subsidence a pu être extraite. Ainsi **le centre historique et la zone située directement au sud** de celle-ci, le long du fleuve, sont concernés.

L'influence de la subsidence sur des zones déjà affectées par le risque d'inondations, à savoir l'augmentation de la fréquence des crues débordantes et de la hauteur de submersion des quartiers concernés, est manifeste. Le secteur le plus sensible est aussi le plus vulnérable : le centre-ville. Il doit bénéficier d'une attention particulière de la part des gestionnaires car il est incontestablement soumis à deux risques concomitants : la subsidence et les inondations.

Bibliographie

BODART C., 2007. Apport de l'interférométrie radar dans l'étude des mouvements de sable (S.-E. du Niger), Mémoire de DEA - Université de Liège

CHANG C.P., CHANG T.Y., WANG C.T., KUO C.H., CHEN K.S., 2004. Land-surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan, *Mathematics and Computers in Simulation*, volume 67, pages 351-359

CHATTERJEE R.S., FRUNEAU B., RUDANT J.P., ROY P.S., FRISON P.L., LAKHERA R.C., DADHWAL V.K. ET SAHA R., 2006. Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1900s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry technique, *Remote Sensing of Environment*, volume 102, pages 176-185

DAMOAH-AFARI P. ET DING X.L., 2005. Measuring ground subsidence in Shanghai using permanent scatterer InSAR technique, (http://www.aars-acrs.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/URM2-3.pdf)

DASSARGUES A. ET ZHANG J., 1992. Land subsidence in Shangaï: hydrogeological conditions and subsidence measurements, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, volume 46, pages 25 – 34

DASSARGUES A., 1995. Vers une meilleure fiabilité dans la calcul des tassements dus aux pompages d'eau souterraine, *Annales de la société géologique de Belgique*, volume 118, fascicule 2, pages 95 - 115, 117 – 138

DEGUCHI T., 2005. Automatic InSAR processing and Introduction of his application studies, (http://www.aars-acrs.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/CDT-4.pdf)

DERAUW D., 1999. Phasimétrie par radar à synthèse d'ouverture; théorie et applications, Thèse – Université de Liège

DIEP N. V., CAN N. H., LAI H. V. ET HA T. T., SD. First Elements of the Decision Support System for Flood Control in the Red - Thai Binh River Basin, (http://www.geos.unicaen.fr/recherche/Flocodsweb/Data/First_Meeting/1st_elements.ppt)

DUTTA D., KHATUN F., HERATH S., 2005. Analysis of flood vulnerability of urban buildings and population in Hanoi, Vietnam, *Seisan Kenkyu (Institute of Industrial Science, University of Tokyo),* volume 57, issue 4, pages 338-342

FERRETTI A., MONTI-GUARNIERI A., PRATI C., ROCCA F. ET MASSONNET D., 2007. InSAR Principles, *Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA

FONTENELLE J.-P., 2006. La décentralisation de l'hydraulique agricole du delta du Fleuve Rouge au Viêt-Nam : rupture ou continuité ? , *Herodote*, volume 121, La découverte, pages 55-72

GILARD O., 2006. Risque d'inondation dans le fleuve rouge, *Herodote*, volume 121, La découverte, pages 42-54

HANSSEN R.F., 2004. Satellite radar interferometry for deformation monitoring a priori assessment of feasibility and accuracy, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, volume 6, pages 253-260

JUSSERET S., 2006. Modélisation sédimentologique et hydrogéologique de la zone de Hanoi (Vietnam), Mémoire de licence – Université de Liège

KIM J.S., KIM D.J., KIM S.W., WON J.S. ET MOON W.M., 2007. Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR, *Geosciences Journal*, volume 11, Issue 1, pages 59-73

LAROUSSE, Dictionnaire illustré. 2006

NGUYEN V.D. ET NGUYEN T.D., 2002. Groundwater pollution in the Hanoi Area, Vietnam, *Conference on groundwater in the Ministry of Planning and Investment*, Hanoi

NGUYEN H., 2006. Action Plan toward Effective Flood Hazard Mapping in Vietnam, Department of Dyke Flood and Storm Control Ministry of Agriculture and Rural Development, Vietnam

RAUCOULES D., COLESANTI C. ET CARNEC C., 2007. Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence, *Compte Rendu Geoscience*, volume 339, pages 289-302

RAUCOULES D., CARNEC C., 1999. DEM derivation and subsidence detection on Hanoi from ERS SAR interferometry, *2nd International Workshop on ERS SAR Interferometry*. Fringe'99, 6 pages

(Speech, 2002) 2nd meeting of FLOCODS Steering Committee, 2002, First elements of decision support system for the red river, (http://kepler.ia.ac.cn/seminars/FOCYR/abstract/Nguyen%20Van%20Diep.pdf)

(Speech, 2003) Speech to be presented at the Vietnam Journalist Workshop organized by ADB, 2003, Hanoi – Hatay dyke subproject, (http://www.adb.org/documents/events/2003/wap/vie/bao_paper.pdf)

STABEL E. ET FISCHER P., 2001. Satellite radar interferometric products for the urban application domain, *Advances in Environmental Research*, volume 5, pages 425-433

THOMAS A., HAYNES M., 2006. Monitoring ground hazards from space, (http://www.GEOconnexionInternational.com)

TIMMERMANAB P. ET WHITE R., 1997. Megahydropolis:coastal cities in the context of global environmental change, *Global Environmental Change*, volume 7, issue 3, pages 205-234

TINH D. Q., NUOI N. S. ET PHUONG N. T., 2003. Flood Control for the Red River, Department of Dike Management and Flood Control, Vietnam, Asian Disaster Reduction Center, pages 30-31

TINH D. Q. ET HERATH S., 2005. Urban Floods – Challenges, (http://unisdr.org/wcdr/thematic-sessions/presentations/session2-4/ddmfsc-mr-dang-quang-tinh.pdf)

TRAN V.A., MASUMOTO S., RAGHAVAN V. ET SHIONO K., 2007. Spatial distribution of subsidence in Hanoi detected by JERS-1 SAR Interferometry, *Geological Data processing*, volume 18, Issue 1, pages 3-13

TRINH T.M. ET FREDLUND D.G., 2000. Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam, *Canadian Geotechnical Journal*, volume 37, Issue 3, pages 621-637

VAN GORP S., 2003. Identification et Utilisation des Réflecteurs Permanents en Interférométrie RADAR, Mémoire de DEA - Institut de physique du Globe de Paris

WANG C., ZANG H., LIU Z., SD. ERS-1/2 interferometry for urban subsidence detection in China,

WORAWATTANAMETEEKUL J., HOFFMANN DR. J., ADAM N., KAMPES B., 2004. Urban deformation monitoring in Bangkok metropolitan (Thailand) using permanent scatterer and differential interferometry technique, (http://adsabs.harvard.edu/)

Webographie :

Sites consultés entre les mois d'octobre 2007 et août 2008

http://academie.oieau.fr/academie/membres/phanoi.htm
http://indexxmundi.com
http://english.vietnamnet.vn
http://vietnamnews.vnagency.com.vn,
http://www.hcg.helsinki.fi
http://fr.wikipedia.org
http://maps.live.com

Liste des figures

Figure 1.1 : Comparaison entre le niveau des aquifères et celui du Fleuve Rouge pour la période 1995-2004. Elle permet de mettre en évidence le lien existant entre les masses d'eau souterraine et le fleuve (Jusseret, 2006)..... 12
Figure 1.2 : Carte politique du Vietnam (CIA world Factbook, 2008) 12
Figure 1.3 : Diagramme ombrothermique de la ville de Hanoi (données mensuelles de pluviométrie et de température des années 1995 à 2007)..... 14
Figure 1.4 : Vue du delta (ou de la plaine deltaïque, selon les usages) de forme grossièrement triangulaire, qui prolonge la vallée du Fleuve Rouge (Jusseret, 2006) 14
Figure 1.5 : Assemblage des cartes topographiques (6151 II et 6150 I) au 1/50.000 de 1980 de la ville de Hanoi, avec ses grands quartiers 16
Figure 1.6 : Carte du réseau hydrographique (lacs, Fleuve Rouge, canaux) avec les stations limnimétriques et les digues. Fond de carte : Google Earth, 2003..... 18
Figure 1.7 : Carte situant les principaux lieux d'extraction des eaux souterraines et les stations de forages (Tran *et al*., 2007)..... 20
Figure 1.8 : Graphique indiquant les taux d'extraction et présenté dans l'article de Tran *et al.,* 2007. 20
Figure 1.9 : Carte présentant les localisations de subsidence mentionnées dans les articles ci-contre cités et quelques lieux de pompage connus 24
Figure 1.10 : Schéma d'une orbite ascendante (à gauche) et descendante (à droite) (Ferretti *et al.*, 2007) 32
Figure 1.11 : Schéma d'acquisition d'une image radar par un satellite ERS (Ferretti *et al.*, 2007) 32
Figure 1.12 : Effets de la topographie sur la résolution des cellules en portée au sol. Les cellules contiennent toutes trois triangles, donc possèdent la même résolution en portée selon la ligne de visée. Les deux premières cellules représentent un terrain plat, la suivante une pente positive avec plus de trois triangles et les deux dernières une pente négative avec moins de trois triangles par cellule. (Ferretti *et al.*, 2007) 32
Figure 1.13 : Effets de la perspective sur la qualité de cellules en portée au sol. La pente DEFG est telle qu'elle est imagée dans des cellules qui ont déjà été imagées précédemment puisqu'elles appartiennent à d'autres parties de terrains (2 et 3), elles sont donc recouvertes (effet de « layover »). Cette pente « extrême » engendre un effet d'ombre de l'autre côté, tel que le point G ne peut être imagé (effet d'ombre). (Ferretti *et al.*, 2007)..... 32
Figure 1.14 : Phénomène de diffusion : les rayons envoyés par la source ne sont, en majorité, pas renvoyés vers elle, ce qui cause une perte du signal..... 36
Figure 1.15 : Relation entre le signal sinusoïdal, la longueur d'onde (λ), le trajet aller-retour (2R) et la phase. On peut constater, qu'effectivement, tout multiple de π fois la longueur d'onde engendre la même phase. (Ferretti *et al.*, 2007)..... 38
Figure 1.16 : Deux images d'une même scène sont acquises par deux senseurs différents dans le cas d'une mission Tandem depuis deux trajectoires voisines lors de leurs passages successifs au-dessus de la même zone. (Ferretti *et al.*, 2007) 38
Figure 1.17 : Schéma explicatif de la nécessité et du processus de déroulement de phase (Derauw, 1999)..... 54
Figure 2.1 : Modèle numérique de terrain géoréférencé en UTM 48 Q, WGS 84 60
Figure 2.2 : Image Google Earth géoréférencée en UTM 48 Q, WGS 84 (2003) avec les limites de la zone d'étude et les points GPS sélectionnés sur le terrain 62
Figure 2.3 : Schéma d'élimination des couples d'images ERS et ASAR..... 62
Figure 2.4 : Sélection des couples d'images dont la ligne de base temporelle est inférieure à 800 jours et la ligne de base spatiale inférieure à la ligne de base critique d'environ 950 mètres 64
Figure 2.5 : Exemple d'extrait d'interférogramme (_int)(couple 1). On aperçoit nettement les franges dues à la phase de terrain plat et topographique (bien que la zone soit quasi plate)..... 66
Figure 2.6 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati (_dint) (couple 1). On aperçoit nettement que les franges dues à la phase de terrain plat et topographique ont été éliminées. 66
Figure 2.7 : Sélection des GCP (croix sur la fenêtre inférieure droite) en parallèle sur une image de cohérence (_cc), de relevé de terrain selon la ligne de visée (_srdem) et l'interférogramme filtré (_fint) 68
Figure 2.8 : Correspondance approximative entre les points GPS sur terrain projeté sur l'image Google Earth de 2003 (en miroir et inclinée de 23°) (à droite) et l'image d'amplitude du 11-02-1996 (à gauche)..... 68
Figure 2.9 : Image de cohérence du 1er couple (11-02_12-02) en correspondance avec une des images d'amplitude du couple et l'histogramme des valeurs de coefficient de cohérence pour ce couple..... 70
Figure 2.10 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati, filtré, déroulé, corrigé et géoréférencé (_upha_VD) (couple 1). On aperçoit quelques parties de franges (exprimées par des teintes différentes) signifiant peut être un changement d'altitude vertical de ces pixels. 70

Figure 2.11 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati et filtré (_fint) (couple 2 et 3). On aperçoit très difficilement des franges, le bruit est omniprésent sur les images. 72
Figure 2.12 : Image de cohérence du 2ème couple (25-08_23_03) en correspondance avec une des images d'amplitude du couple et l'histogramme des valeurs de coefficient de cohérence pour ce couple. 72
Figure 2.13 : Image de cohérence du 3ème couple (30-08_23_10) en correspondance avec une des images d'amplitude du couple et l'histogramme des valeurs de coefficient de cohérence pour ce couple. 74
Figure 2.14 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati, filtré, déroulé, corrigé et géoréférencé (_upha_VD) (couple 2). On aperçoit plus du tout de franges mais quelques nuances (exprimées par des teintes différentes) signifiant peut être un changement d'altitude vertical de ces pixels. 74
Figure 2.15 : Exemple d'extrait d'interférogramme aplati, filtré, déroulé, corrigé et géoréférencé (_upha_VD) (couple 3). On n'aperçoit plus aucune de franges mais quelques nuances (exprimées par des teintes différentes) signifiant peut-être un changement vertical d'altitude de ces pixels. 76
Figure 2.16 et 2.17 : L'image d'amplitude ERS géoréférencée en UTM 48 Q, WGS 84 du 30-08-1999 est superposée, à gauche au résultat de la classification de l'image finale du couple 2 (210 jours) et à droite à celui du couple 3 (420 jours). 78
Figure 2.18 : Tentative, vaine, de sélection des GCP en parallèle sur une image de cohérence (_cc), de relevé de terrain selon la ligne de visée (_srdem) et l'interférogramme filtré (_fint) du couple sur HCMC. 78
Figure 2.19 : Masques des images de cohérence du 1er, 2ème et 3ème couple. La flèche rouge pointe le sud du lac de l'Ouest. 80
Figure 2.20 : Réflecteurs permanents (en jaune, résultat de la fusion des trois masques) superposés à l'image Google Earth de 2003 géoréférencée en UTM 48 Q, WGS 84. 80
Figure 3.1 : Transect de la ville au niveau du pont Long Bien (Tinh *et al.*, 2005). 82
Figure 3.2 : Digue surélevée par rapport à la ville (les deux lignes symbolisent les deux niveaux : digue et ville) (Photographie A. NOEL, 20-03-2008) 82
Figure 3.3 : A gauche, lac asséché avec une pompe en avant plan (13-03-2008) et à droite, immeuble de résidence bâti sur un lac encore en voie d'assèchement (14-03-2008)(Photographie A.NOEL). 84
Figure 3.4 : Hausse du lit du fleuve entre les années 1960 et 1996 pour un débit de 20 000 m³ à Son Tay (Speech, 2002). 84
Figure 3.5 : Exploitation du sable du lit du fleuve (Photographie A.NOEL, 13-03-2008) 84
Figure 3.6 : « Canaux d'égouttage » servant également à la dérivation des flux en cas de crue (Photographie A.NOEL, 13 et 16-03-2008). 86
Figure 3.7 : Image Quickbird du 04-08-2004 (http://mapsLive.com) d'une crue du Fleuve Rouge. Sur l'image du bas, on distingue les quartiers entiers qui sont inondés car ils sont situés en avant de la digue. 86
Figure 3.8 : Carte schématique mettant en évidence l'importance du nombre de constructions édifiées à même les berges et la photographie montre les stigmates d'une inondation (Fond de carte Google Earth, 2003 et photographies A.NOEL le 13-03-2008) 88
Figure 3.9 : Casier (Fontenelle, 2006). 90
Figure 3.10: Elévation du cours d'eau et des digues Nghia et Chau, 2002 90
Figure 3.11 : Schéma non exhaustif des solutions structurelles mises en place dans la lutte contre les inondations (sur base de la carte topographique (F-48-11) au 1/250.000 de 1954 et des éléments des articles ci-dessus cités) 92
Figure 3.12 : Digue discontinue (Photographie A.NOEL 13-03-2008) 94
Figure 3.13 : Influence de la subsidence sur les ouvrages d'art, à gauche un mur de canal et à droite un pont en « altitude » (Photographie A.NOEL, 13-03-2008) 96
Figure 3.14 : Localisation des diverses photographies présentées ci-dessus. 96