

# **TABLE DES MATIERES**

## **INTRODUCTION..... 7**

<b>I. CONTEXTE SCIENTIFIQUE, PROBLEMATIQUE ET ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>7</b>
I.1 CONTEXTE SCIENTIFIQUE .....	7
I.2.1 La maison de la télédétection et le CIRAD .....	7
I.2.2 Le projet RIVERS .....	7
I.2 PROBLEMATIQUE .....	7
II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE .....	8
<b>III. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE GENERALE.....</b>	<b>9</b>
III.1. OBJECTIFS .....	9
III.2. METHODOLOGIE GENERALE .....	9

## **CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ..... 10**

<b>I. LA GRIPPE AVIAIRE .....</b>	<b>10</b>
I.1. LE VIRUS ET SA TRANSMISSION .....	10
I.1.1. Généralités .....	10
I.1.2. Transmission du virus H5N1 .....	11
I.2. VIRUS ET PRATIQUES AGRICOLES .....	11
I.3. VIRUS ET SAISONNALITE .....	12
I.4. LA SURVIE DU VIRUS DANS L'ENVIRONNEMENT .....	12
I.4.1. La température et l'eau .....	13
I.4.2. La salinité de l'eau .....	13
I.4.3. Autres paramètres.....	13
<b>II. L'UTILISATION DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE DANS L'ETUDE DU VIRUS DE LA GRIPPE AVIAIRE H5N1 .....</b>	<b>14</b>
II.1. APPORT DE LA TELEDETECTION .....	14
II.2. ANALYSES DES CORRELATIONS ENTRE DONNEES EPIDEMIOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTALES : APPORT DES SIG. ....	15
<b>III. LES PROPRIETES DE L'EAU PAR TELEDETECTION .....</b>	<b>17</b>
III.2. DETECTION DE L'EAU LIBRE .....	17
III.2.1. La télédétection passive : la réflectance de l'eau pure dans le visible et le proche infrarouge .	17
III.2.1. La détection de l'eau libre par radar .....	21
III.3. DETECTION DES SURFACES INONDEES .....	22
III.3.1. La détection des surfaces inondées par télédétection passive .....	22
III.3.2. La détection des surfaces inondées par télédétection active (radar) .....	22
III.4. INFLUENCE DES PROPRIETES DE L'EAU SUR SA SIGNATURE SPECTRALE .....	24
III.4.1. La turbidité .....	24
III.4.2. La température.....	27
III.4.3. La profondeur .....	27
<b>IV. CONCLUSION .....</b>	<b>28</b>

**CHAPITRE 2 : APPLICATION DE LA TELEDETECTION A L'ETUDE  
DES FACTEURS DE RISQUE LIES A L'EAU DE SURVIE DU VIRUS  
H5N1 ..... 29**

**I. LES DONNEES ..... 29**  
I.1. LES IMAGES SATELLITES ..... 29  
I.1.1. Les données MODIS ..... 29  
I.1.2. Les données Landsat ..... 30  
I.2. ACQUISITION ET PREPARATION DES DONNEES ..... 30  
I.2.1. Acquisition, reprojexion, et redimensionnement ..... 30  
I.2.2. Création d'un masque de nuage ..... 30  
I.3. BILAN DES DONNEES EXPLOITABLES..... 31  
**II. IDENTIFICATION DES ZONES EN EAU ET INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX ..... 32**  
II.1. TEST DES INDICES DE L'EAU..... 32  
C'EST L'INDICE MNDWI QUI EST CHOISI, IL PARAIT LE PLUS INTERESSANT POUR DETECTER L'EAU SUR  
LES IMAGES..... 32  
II.2 CHOIX D'UN INDICE ET D'UN SEUIL ..... 33  
II.2.1 Image Landsat..... 33  
II.2.2 Données de terrain ..... 36  
II.3. CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDEES PAR ADDITION ..... 38  
II.4 TEST DE LA METHODE DES SERIES TEMPORELLES..... 38  
II.5. ANALYSE DES RESULTATS ET VALIDATION..... 41  
II.5.1 Analyse des résultats..... 41  
II.5.2. Validation des résultats par l'utilisation de données annexes ..... 45  
**III. CROISEMENT DE DONNEES..... 47**  
III.1. LES DONNEES EPIDEMIOLOGIQUES ..... 47  
III.2 UTILISATION D'UN SIG POUR CROISER LES DONNEES ..... 49  
III.3 ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION ..... 50

**CONCLUSION..... 51**

**BIBLIOGRAPHIE ..... 52**

**ANNEXES ..... I**

## **TABLE DES ANNEXES**

ANNEXE 1. — BANDES DU CAPTEUR MODIS.....	I
ANNEXE 2. — DESCRIPTION DU PRODUIT DE SYNTHÈSE MODIS MOD09A1.....	II
ANNEXE 3. — GRILLE SINUSOÏDALE, MODIS.....	III
ANNEXE 4. — POSSIBILITÉS DE TÉLÉCHARGEMENT DE DONNÉES MODIS ET INFORMATIONS POUR LES PRODUITS.....	IV
ANNEXE 5. — PRÉTRAITEMENTS DES IMAGES MODIS.....	V
ANNEXE 6. — BATCHS.....	VI
ANNEXE 7. — TEST DES INDICES POUR DÉTECTER L'EAU PENDANT LA SAISON SECHÈ (65) ET LA SAISON HUMIDE (297) .....	XII
ANNEXE 8. — LOCALISATION DE 'L'IMAGE LANDSAT.....	XIII
ANNEXE 9. — VALEUR MOYENNE DES INDICES MNDWI ET NDVI PAR CLASSE PENDANT LA SAISON SECHÈ 2006-2007 (CLASSIFICATION NON SUPERVISEE, METHODE DES NUEES DYNAMIQUES).....	XIV
ANNEXE 10. — OCCUPATION DU SOL DANS LES ZONES INONDEES A PARTIR DU CROISEMENT DE LA CARTE DES TEMPS D'INONDATION ET LA CARTE D'OCCUPATION DU SOL.....	XV
ANNEXE 11. — CARTE DU CAMBODGE, UNIVERSITE DU TEXAS, ETATS-UNIS.....	XVI
ANNEXE 12. — L'EAU AU CAMBODGE SELON LA CHARTE NUMERIQUE DU MONDE (DCM).....	XVII
ANNEXE 13. — CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL EN 2000.....	XVIII
ANNEXE 14. — CROISEMENT DES SUPERFICIES DE CLASSES ENTRE LA CLASSIFICATION COMBINEE DE DEUX INDICES ET LA CLASSIFICATION EUROPEENNE.....	XIX

## **TABLE DES FIGURES**

FIGURE 1. — <i>SITE ET SITUATION DU CAMBODGE</i> .....	8
FIGURE 2. — <i>ELEVAGE EXTENSIF DE VOLAILLES AU CAMBODGE, TRAN, OCTOBRE 2007</i> .....	11
FIGURE 3. — <i>CALENDRIER THEORIQUE DES PRATIQUES HUMAINES ET DE DONNEES NATURELLES</i> .....	12
FIGURE 4. — <i>RAYONNEMENT INCIDENT ET LUMINANCE DE L'EAU CAPTEE</i> .....	18
FIGURE 5. — <i>REFLECTANCE DE L'EAU ET D'AUTRES TYPES DE SURFACE DANS DIFFERENTES LONGUEURS D'ONDE</i> ...	18
FIGURE 6. — <i>CLASSIFICATION D'UN NUAGE DE POINTS EN SIX CLASSES DANS UN ESPACE A TROIS DIMENSIONS</i> .....	33
FIGURE 7. — <i>RESULTAT DE LA CLASSIFICATION PAR NUAGES DYNAMIQUES EN 15 CLASSES DE L'IMAGE LANDSAT (NOVEMBRE 2001)</i> .....	34
FIGURE 8. — <i>REFLECTANCE DE LA MOYENNE DES CLASSES ISSUES DE LA CLASSIFICATION DE L'IMAGE LANDSAT PAR LA METHODE DES NUAGES DYNAMIQUES</i> .....	35
FIGURE 9. — <i>LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE LORS DE LA VISITE DE TERRAIN EN OCTOBRE 2007</i> .....	36
FIGURE 10. — <i>LOCALISATION DES DONNEES DE 10 ZONES EN EAU LORS DE LA VISITE DE TERRAIN EN OCTOBRE 2007</i> .....	37
FIGURE 11. — <i>ADDITION</i> .....	38
FIGURE 12. — <i>TEMPS D'INONDATION AU CAMBODGE DURANT LA SAISON SECHE 2006-2007 ETABLIS A PARTIR DE L'ADDITION DES IMAGES BINAIRES PROVENANT DU SEUILLAGE DE L'INDICE MNDWI</i> .....	39
FIGURE 13. — <i>CLASSIFICATION NON SUPERVISEE CHRONOLOGIQUE REALISEE A PARTIR D'UNE IMAGE COMPRENANT 6 BANDES PROVENANT DE 6 IMAGES EN NIVEAU DE GRIS DE L'INDICE MNDWI AU COURS DE LA SAISON SECHE 2006-2007</i> .....	40
FIGURE 14. — <i>CLASSIFICATION NON SUPERVISEE CHRONOLOGIQUE REALISEE A PARTIR D'UNE IMAGE COMPRENANT 6 BANDES PROVENANT DE 6 IMAGES EN NIVEAU DE GRIS DE L'INDICE NDVI AU COURS DE LA SAISON SECHE 2006-2007</i> .....	42
FIGURE 15. — <i>CLASSES OBTENUES A PARTIR D'UNE CLASSIFICATION NON SUPERVISEE CHRONOLOGIQUE (IMAGES EN NIVEAU DE GRIS DE L'INDICE MNDWI SUR LA SAISON SECHE 2006/2007)</i> .....	43
FIGURE 16. — <i>CLASSES OBTENUES A PARTIR D'UNE CLASSIFICATION NON SUPERVISEE CHRONOLOGIQUE (IMAGES EN NIVEAU DE GRIS DE L'INDICE NDVI SUR LA SAISON SECHE 2006/2007)</i> .....	43
FIGURE 17. — <i>CLASSIFICATION OBTENUE A PARTIR DE L'ADDITION DE DEUX CLASSIFICATIONS NON SUPERVISEES CHRONOLOGIQUES D'IMAGES EN NIVEAU DE GRIS DES INDICES MNDWI ET NDVI AU COURS DE LA SAISON SECHE 2006-2007 AU CAMBODGE</i> .....	44
FIGURE 18. — <i>LES PROVINCES SURVEILLEES EN 2006</i> FIGURE 19. — <i>LES VILLAGES INFECTES EN 2006</i> .....	48
FIGURE 20. — <i>HEXAGONES INFECTES ET NON INFECTES</i> .....	49

## **TABLE DES TABLEAUX**

TABEAU 1. — <i>CALENDRIER DE TRAVAIL</i> .....	9
TABEAU 2. — <i>INDICES POUR DETECTER L'EAU</i> .....	20
TABEAU 3. — <i>INDICES DE TURBIDITE</i> .....	26
TABEAU 4. — <i>DONNEES EXPLOITABLES SUR L'ANNEE 2006</i> .....	31
TABEAU 5. — <i>TESTS DES INDICES DE L'EAU</i> .....	32
TABEAU 6. — <i>CROISEMENT DU NOMBRE DE PIXELS EN EAU OU NON A PARTIR DE LA CLASSIFICATION NON SUPERVISEE DE L'IMAGE LANDSAT ET DES IMAGES BINAIRES MODIS OBTENUE PAR SEUILLAGE</i> .....	35
TABEAU 7. — <i>IMAGES UTILISEES POUR LE TEST DE LA METHODE DES SERIES TEMPORELLES</i> .....	38
TABEAU 8. — <i>INTERPRETATION DES CLASSES DE LA CLASSIFICATION COMBINEE, PAR L'OBSERVATION DES VALEURS DES INDICES MNDWI ET NDVI</i> .....	45
TABEAU 9. — <i>INTERPRETATION DES CLASSES DE LA CLASSIFICATION COMBINEE PAR L'APPORT DE NOUVELLES DONNEES</i> .....	46
TABEAU 10. — <i>POURCENTAGE DE VILLAGES INFECTES EN FONCTION DE LA DUREE D'INONDATION</i> .....	50

## ***Introduction***

### **I. Contexte scientifique, problématique et zone d'étude**

#### I.1 Contexte scientifique

##### *I.2.1 La maison de la télédétection et le CIRAD*

Ce stage a été effectué à la maison de la télédétection à Montpellier. La maison de la télédétection regroupe des équipes de recherche de différents centres et instituts de recherche (AgroParisTech/ENGREF<sup>1</sup>, Cemagref<sup>2</sup>, CIRAD<sup>3</sup> et IRD<sup>4</sup>) pour constituer un pôle de recherche appliquée en télédétection et information géographique.

Le CIRAD est l'institut français de recherche agronomique au service du développement des pays du Sud et de l'outre-mer français. Il est divisé en trois départements, le département BIOS<sup>5</sup>, le département PERSYST<sup>6</sup>, et le département Environnements et sociétés.

Le stage a été effectué pour l'unité de recherche « Animal et gestion intégrée des risques » (AGIRs) du département Environnements et sociétés.

##### *I.2.2 Le projet RIVERS*

Le projet RIVERS (résistance des virus influenza dans les réservoirs et systèmes environnementaux) vise à comprendre le rôle de l'environnement (eau, fumier, déjection, nourriture, air, surface des sols, bâtiments...) dans la survie du virus H5N1 et dans la réémergence de la grippe aviaire.

Les objectifs du projet sont la compréhension et l'analyse de l'écologie du virus, l'évaluation d'un réservoir environnemental, la proposition de protocoles standardisés de concentration et de détection du virus dans les eaux et différentes matières (incluant la nourriture) et enfin la proposition d'une base de données et des outils analytiques afin de générer des recommandations et des méthodes de contrôles en cas de foyers humains et animaux.

Les activités mises en œuvre par l'unité AGIRs dans le cadre de ce projet sont menées plus particulièrement au Cambodge en collaboration avec l'Institut Pasteur et l'ICM<sup>7</sup> de Varsovie. Il s'agira d'élaborer un modèle de survie du virus dans différents milieux, avec une intégration d'éléments spatialisés et dynamiques.

#### I.2 Problématique

Le virus de grippe aviaire hautement pathogène H5N1 dont les premiers cas ont été recensés en Asie (Chine, 1996) ré-émerge périodiquement dans certaines régions du Sud-est asiatique (Cambodge, Chine, Indonésie, Malaisie, Thaïlande, Vietnam) (OMS<sup>8</sup>, 2008). C'est une maladie infectieuse, touchant en premier lieu l'avifaune, et dont la progression et les réapparitions posent de nombreuses questions quant à sa transmission et son éventuelle survie dans l'environnement. En effet, la prise en compte de l'écologie de la maladie semble constituer un point important pour prévenir et gérer les vagues d'épidémies (FAO<sup>9</sup>, 2008).

Cependant, les connaissances scientifiques sont peu conséquentes sur l'écologie des virus de grippe hautement pathogènes (et particulièrement le H5N1), souvent anciennes et parfois non confirmées, voire contradictoires (RIVERS).

<sup>1</sup> Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement

<sup>2</sup> La recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement

<sup>3</sup> Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

<sup>4</sup> Institut de recherche pour le développement

<sup>5</sup> Systèmes biologiques

<sup>6</sup> Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux

<sup>7</sup> Université de Varsovie

<sup>8</sup> Organisation mondiale de la santé

<sup>9</sup> Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

Néanmoins, la littérature scientifique offre quelques informations intéressantes. En effet, d'après plusieurs études (Chen *et al.*, 2006; Zarkov, 2006; Brown *et al.*, 2007), le virus aurait la capacité de survivre dans l'eau, plus ou moins longtemps suivant les caractéristiques du milieu. Dans ce contexte, la télédétection pourrait être un outil intéressant permettant d'identifier les zones en eau, de classer les types d'eau suivant différents paramètres (forme –linéaire, etc.-, couleur –profondeur, turbidité-, température essentiellement) et de définir des indicateurs de risque sanitaire.

Ces informations devraient s'insérer dans un système complexe d'analyse du risque, en complément d'autres données de type environnemental (température, présence d'oiseaux migrateurs etc.) ou humain (présence d'élevage, réseau routier, densité des populations humaines etc.).

## II. Présentation de la zone d'étude

Le Cambodge, situé en Asie du sud-est, possède une superficie de 181 000 km<sup>2</sup>. Il s'étend sur 580 kilomètres d'est en ouest et sur 450 kilomètres du nord au sud. Pays frontalier du Laos (au nord), de la Thaïlande (à l'ouest) et du Vietnam (à l'est), il possède une ouverture maritime sur le golfe de Thaïlande.

Sa topographie s'ordonne autour du Mékong (principal fleuve du pays) et du Tonlé-Sap (le plus grand lac d'Asie du sud-est). Le Mékong, qui prend sa source au Tibet, traverse le Cambodge, puis le Vietnam pour rejoindre la mer de Chine. Pendant la saison des pluies, le Mékong déverse son trop-plein dans le lac (dont la superficie peut doubler) et pendant la saison sèche, le lac alimente en partie le fleuve. Le Cambodge est en effet situé dans une zone climatique tropicale à deux saisons :

- la saison des pluies s'échelonne de mai à novembre,
- la sécheresse s'étend de décembre à avril.

C'est un territoire de plaines dans sa grande majorité, bordé au sud-est par le massif du Phnom Aural (il culmine à 1 813 mètres) et au sud-ouest par la chaîne des Cardamomes (qui borde le golfe de Thaïlande).

Le pays est peuplé d'environ 15 millions de personnes. La majorité de la population se concentre au bord du lac Tonlé Sap et du Mékong. Son activité principale est l'agriculture, et particulièrement la culture du riz (première production agricole, elle occupe 70 % des terres agricoles), la pêche et la production bovine. L'élevage aviaire est surtout destiné à l'autoconsommation, il concerne en premier lieu les poulets (80 % de la production) puis les canards, et très rarement les dindes et les oies.

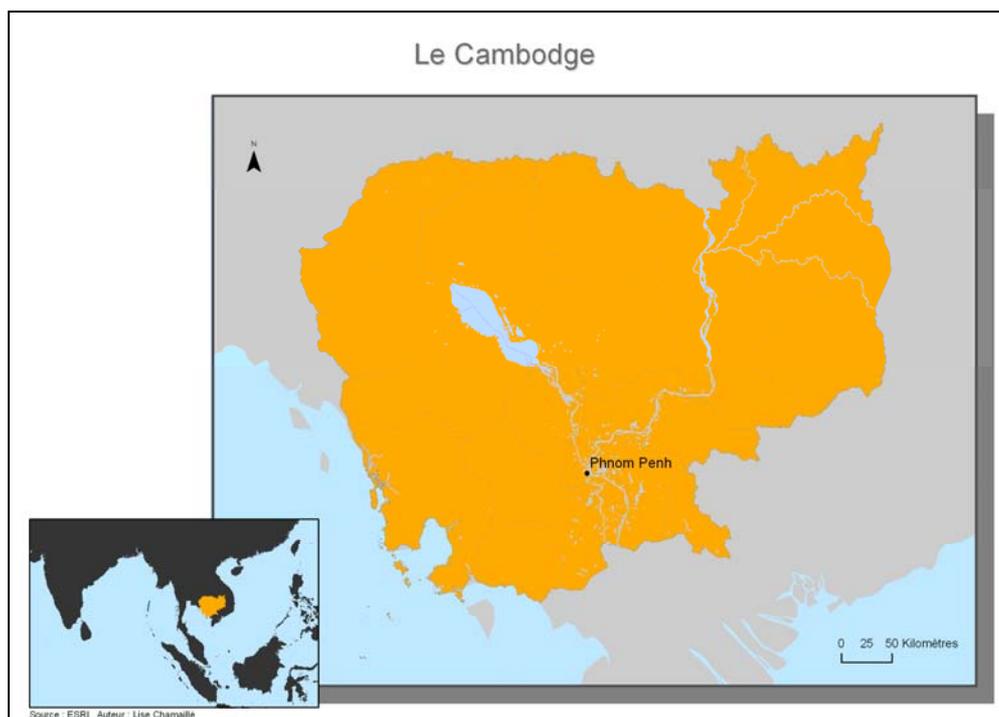


Figure 1. — Site et situation du Cambodge

### III. Objectifs et méthodologie générale

#### III.1. Objectifs

Deux objectifs principaux du stage :

- Produire une synthèse bibliographique portant sur le virus H5N1 (définition, particularités, survie dans l'environnement), l'utilisation de l'information géographique dans le cadre d'une surveillance épidémiologique de la maladie, et enfin le potentiel de la télédétection pour détecter l'eau et pour caractériser des propriétés de l'eau.
- L'utilisation d'images à moyenne résolution MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) pour cartographier les zones en eau au Cambodge au cours d'une année et la mise en relation de la cartographie produite avec des données épidémiologiques.

#### III.2. Méthodologie générale

Dans un premier temps, pour réaliser la synthèse bibliographique, des articles ont été recherchés dans la littérature scientifique à partir de bases de données en ligne (Scopus, Cémadocs). Des données complémentaires ont été recherchées sur plusieurs sites web institutionnels (FAO, OMS, OIE<sup>1</sup>).

Une soixantaine d'articles ont été lus afin de produire cette synthèse, la liste des articles portant sur les trois thématiques abordées étant non exhaustive (voir bibliographie).

Dans un deuxième temps, impartit aux données de télédétection, nous avons procédé successivement au choix des images (type d'image), à leur prétraitement, au choix d'indices, et à la cartographie. Enfin, les données épidémiologiques ont été croisées en toute fin de stage, car celles-ci provenaient de travail d'une autre stagiaire, basé au Cambodge.

Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Synthèse bibliographique				
	Choix des images			
		Prétraitements et Test d'indices		
			Test séries temporelles	
				Analyse des données épidémiologiques
			Analyse des résultats et Rédaction du rapport	

Tableau 1. — Calendrier de travail.

<sup>1</sup> Organisation mondiale de la santé animale

## **Chapitre I : Synthèse bibliographique**

### **I. La Grippe aviaire**

#### I.1. Le virus et sa transmission

##### *I.1.1. Généralités*

###### I.1.1.1. Définition

« L'influenza aviaire (IA), provoquée par le virus de l'influenza de Type «A» est une maladie animale qui peut infecter plusieurs espèces d'oiseaux d'élevage (poulets, dindons, cailles, pintades, etc.) ainsi que les oiseaux d'ornement et les oiseaux sauvages, certaines souches entraînant un taux de mortalité élevé. Ce virus a également été isolé chez des mammifères dont l'homme, le rat et la souris, le vison et le furet, le porc, le chat, le tigre et le chien. » (OIE, 2008)

###### I.1.1.2. Historique

Le virus H5N1, hautement pathogène et responsable de l'épizootie (maladie frappant une espèce ou un groupe d'espèces) actuelle, est apparu en 1997 dans un élevage de volailles à Hong-Kong où pour la première fois a été observée une transmission à l'homme. À partir de 2003, le virus s'est étendu inexorablement dans une bonne partie de l'Asie du Sud. Depuis la fin 2005, l'épizootie a lentement progressé vers l'ouest en Eurasie, puis vers l'Europe en novembre 2005 et enfin en Afrique début 2006 (OMS, 2008). Depuis 2003, les vagues d'épidémie observées sont plus graves et plus importantes (FAO, 2008).

Aujourd'hui on parle d'une épizootie, à caractère zoonotique (maladie transmissible à l'Homme) qui pourrait évoluer vers une pandémie (transmissible d'Homme à Homme) (OMS, 2008).

Entre 2003 et 2008, 61 pays ont recensé des cas de grippe aviaire chez les oiseaux sauvages ou les volailles, et sur les 6438 foyers recensés, plus de la moitié concerne le Vietnam et la Thaïlande (environ 56%) (OIE, 2008). On dénombre à l'heure actuelle 378 cas humains de grippe H5N1 et 238 décès dans le monde (FAO, 2008).

Le premier foyer au Cambodge a été confirmé en janvier 2004 ; ainsi, le pays est le 5<sup>ème</sup> à déclarer un cas d'influenza aviaire depuis le début de l'épidémie en 2003. De 2004 à 2007 plusieurs foyers ont été identifiés, pour un total de 22 comptabilisés. Ces cas ont concerné en premier lieu les volailles mais aussi pour un cas les oiseaux sauvages (présents dans un centre de soin de la faune sauvage) (Conan, 2008). Les sept provinces touchées sont pour la plupart situées dans le sud-est du pays (Holl, 2007, cité par Conan, 2008). Sept cas humains ont été identifiés au Cambodge, dans les provinces frontalières avec le Vietnam, situées dans le sud-est du pays (OIE, 2008).

Cette crise pose de nombreux problèmes socioéconomiques dans l'agriculture et l'industrie de la volaille et représente aussi une menace importante pour la santé humaine.

###### I.1.1.3. Situation actuelle en Asie du sud-est

Plusieurs mesures sanitaires ont été observées dans les pays de l'Asie du sud-est, comme des méthodes de détection, d'abatage et de vaccination. Au Cambodge, malgré les faibles ressources du pays, depuis juillet 2004 un système de surveillance des marchés, des élevages, et de certains villages a même été mis en place (Desvaux, 2006, cité par Conan, 2008). Mais, malgré les mesures sanitaires mises en œuvre, ces pays sont menacés par des réémergences périodiques du virus, ce qui nécessite la mise en place de nouvelles stratégies.

Un des enjeux fondamentaux de la maîtrise du virus semble être la compréhension de l'écologie de la maladie, et particulièrement des facteurs qui favorisent la réapparition de nouveaux cas.

### 1.1.2. Transmission du virus H5N1

Les oiseaux sauvages aquatiques constitueraient le réservoir naturel des virus de grippes qui seraient ainsi constamment en mouvement. Les oiseaux introduiraient donc les virus dans de nouvelles zones par voies migratoires, en contaminant les volailles par contact direct ou indirect.

Aujourd'hui, plusieurs races d'oiseaux sauvages ou de volailles (notamment les canards) ont été identifiées comme réservoirs pour les virus de grippe aviaire (OMS, 2008).

Le virus est transmis soit par contact direct avec un oiseau infecté, soit indirectement par une exposition à des matériaux contaminés par des fèces infectés ou des sécrétions respiratoires. (FAO, 2008). Lorsque les volailles sont regroupées dans des abris la nuit dans les villages, et sur les marchés les risques de transmissions sont donc plus élevés. De même lors de la saison sèche, lorsque les volailles et les oiseaux sauvages se regroupent autour de points d'eau, les risques augmentent (Gilbert, Xiao *et al.* 2006).

Il existerait également une transmission possible du virus via de l'eau contaminée (plus de détails sur la survie du virus dans l'environnement dans la partie §I.4).

Plusieurs études montrent que la présence du virus pourrait être liée non seulement aux migrations d'oiseaux sauvages, mais aussi à certaines pratiques agricoles. Ainsi, comme le souligne la FAO en mars 2008 « Plutôt que les poulets, les canards, les hommes et les rizières seraient les principaux facteurs à l'origine des foyers du virus H5N1 hautement pathogène de la grippe aviaire en Thaïlande et au Vietnam, et expliqueraient la persistance des foyers dans d'autres pays de la région comme le Cambodge et la République Populaire Démocratique du Laos. »

### 1.2. Virus et pratiques agricoles

Quelques études récentes mettent en évidence le lien entre riziculture, élevage de volailles en Asie et présence du virus H5N1.

En Asie du sud-est on observe un agrosystème traditionnel associant la riziculture et l'élevage de canards : suivant un système de rotation, après les récoltes, des groupes de canards sont déplacés de rizières en rizières où ils se nourrissent de résidus de grains de riz, d'insectes et de vers (Gilbert *et al.*, 2006) (voir photo).

Gilbert *et al.* (2006) en Thaïlande et Pfeiffer *et al.* (2007) au Vietnam ont montré d'une part une forte corrélation entre la production de riz (nombre de récoltes par an) et le nombre de canards d'élevage, et d'autre part, un lien entre les concentrations de canards dans les rizières et la probabilité d'apparition de cas de grippe.



Figure 2. — Élevage extensif de volailles au Cambodge, Tran, octobre 2007

Les rizières sembleraient ainsi constituer un facteur important dans la persistance du virus dont les canards seraient un des réservoirs potentiels. De plus, des observations montrent que ces animaux ne sont que rarement victimes de la maladie, et pourraient ainsi la transmettre à de nombreux autres oiseaux. (Gilbert, Xiao *et al.* 2006; Pfeiffer, Minh *et al.* 2007). Ces observations montrent de plus que le climat de moussons ainsi que les pratiques humaines induiraient une certaine saisonnalité dans l'écologie de la maladie.

### I.3. Virus et saisonnalité

En Thaïlande, le plus grand nombre de détection de virus coïncide avec les périodes de plus basses températures (octobre à février), époque à laquelle les oiseaux du Nord et du Centre de l'Asie migrent vers la Thaïlande. On constate alors une coexistence entre espèces d'oiseaux sauvages et volailles dans les rizières et autour de points d'eau.

C'est aussi pendant cette saison qu'on trouve de nombreux troupeaux de canetons (septembre à octobre), qui sont en pleine croissance en novembre-décembre, au cours des récoltes. (Tiensin, Nielen *et al.* 2006)

Les rizières sont non seulement un habitat favorable pour les canards mais également pour les oiseaux sauvages. Il y a donc un fort effet de saisonnalité dans le nombre de contacts entre volailles et oiseaux sauvages. De plus, du point de vue spatial, il est important de noter que la distribution des terres inondées est liée à la mousson -au Cambodge, le lac Tonlé-Sap double en surface à cette période- (Gilbert 2008).

La saison sèche coïncide aussi avec les festivals de fin d'année où il y a une forte demande en volailles. Il y a transport, abattage et vente de volailles avec une augmentation induite du nombre de mouvements des animaux (Tiensin, Nielen *et al.* 2006)

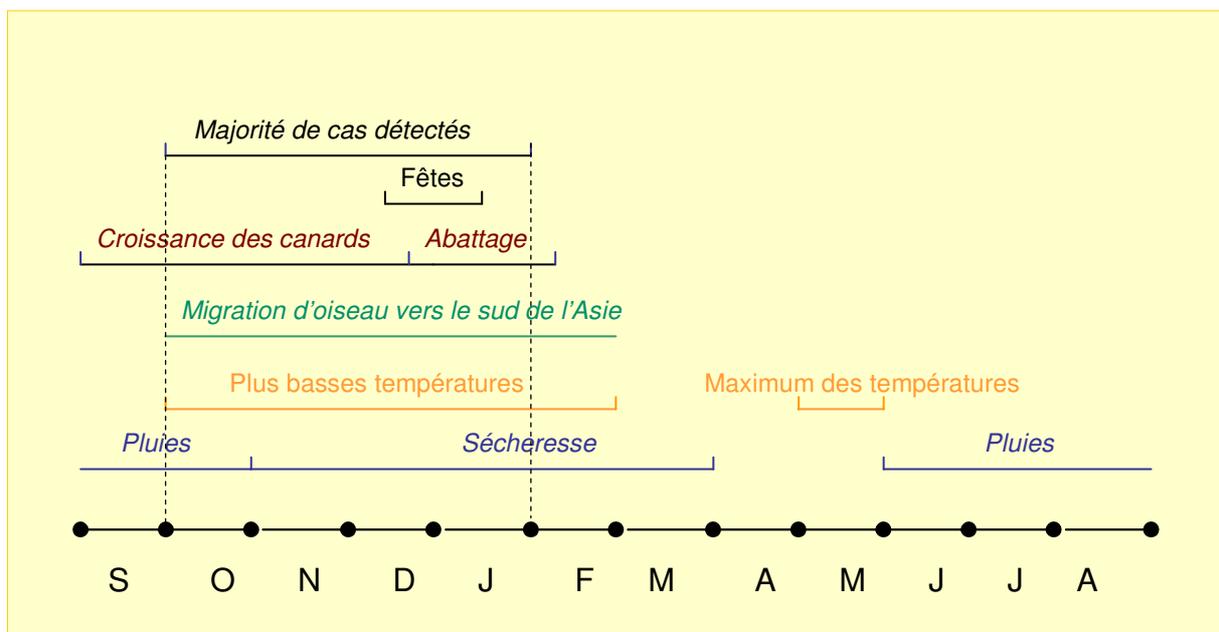


Figure 3. — Calendrier théorique des pratiques humaines et de données naturelles.

### I.4. La survie du virus dans l'environnement

Même si peu de détails sont connus sur la persistance du virus dans l'environnement, plusieurs études offrent des résultats intéressants. On rapporte ici les conclusions relatives aux virus de grippe aviaire, et plus particulièrement celles concernant le H5N1.

Les virus de grippe aviaire faiblement pathogènes et hautement pathogènes ont peu de chance de survivre en dehors d'un hôte car leur persistance dans l'environnement est conditionnée par l'humidité, la température et la salinité (FAO, 2008).

Les virus de grippe, pourraient survivre au moins 35 jours dans des fèces à une température de 4°C, et 12 jours en conditions humides à l'ombre à une température voisine de 25 à 33°C (Martin, 2006). De plus, ils pourraient survivre cinq semaines dans un poulailler (Webster, 1978 cité par Martin, 2006).

D'autres études précisent que les virus de grippe hautement pathogènes peuvent survivre longtemps dans les fèces des oiseaux à basse température (Stallknecht *et al.* 1990) et peuvent même survivre congelés dans l'Arctique (Ito *et al.* 1995).

Dans les fèces secs à température ambiante, le virus H5N1 est inactif alors que l'infectiosité est maintenue pendant 4 jours dans des fèces humides à 25°C (Shortridge, 1998). D'autres études montrent que le virus pourrait même survivre jusqu'à 6 jours dans de la matière fécale à 37° (OMS, 2008)

La capacité des virus à résister dans l'environnement est variable dans les mêmes sous-types et entre les virus H5N1. Ainsi, les virus H5N1 ont la particularité de résister moins longtemps dans l'environnement que les autres virus de grippe (Brown, *et al.* 2007)

Selon Brown *et al.* la transmission fécale-orale via de l'eau contaminée (mares, rizières, terrains inondés) serait un mécanisme reconnu de la transmission des virus de grippe dans les populations d'oiseaux. (Brown, *et al.* 2007). Cette transmission serait liée à la capacité du virus à survivre dans l'eau et celle-ci serait conditionnée par plusieurs paramètres entrant parfois en interaction dont les deux principaux sont la température et la salinité.

#### 1.4.1. La température et l'eau

Généralement, plus la température de l'eau augmente, moins les virus de grippe ont de chances de survie. Ainsi, les virus pourraient persister des années dans l'eau gelée des lacs d'altitude (FAO Animal production and Health 2008).

Les virus de grippe aviaires survivraient 5 jours ou moins à une température supérieure à 30°C et 10 jours ou moins à une température inférieure à 20°C. (Gilbert, 2006)

Dans de l'eau distillée, les virus faiblement pathogènes peuvent survivre de 125 à 127 jours quand la température est à 17°C (Stallknecht 1990). Ils peuvent survivre 4 jours dans les eaux d'un lac à 22°C et 30 jours à 0°C (Webster 1978 cité par Martin 2006)

Phuong *et al.* (2005) ont testé la persistance du virus H5N1 dans différents types d'eau dans la province de Thai Binh à différentes températures. Dans des conditions expérimentales, à 20-25°C, le virus est inactif après six heures dans l'eau de mer (eaux côtières), après 24 heures dans l'eau d'une mare et dans l'eau d'oued. Le virus est inactif dans les trois types d'eau à 37°C. Par contre, il n'est pas rendu inactif après quatre jours à 4°C (Phuong, 2005).

#### 1.4.2. La salinité de l'eau

Plus l'eau est salée, moins longtemps survit le virus, la salinité aurait un rôle prééminent à de basses températures. Le virus H5N1 qui paraît moins résistant que les autres virus de grippe aviaire dans l'environnement, aurait une résistance similaire aux autres virus de grippe hautement pathogènes dans les eaux salées (Brown, Swayne *et al.* 2007).

#### 1.4.3. Autres paramètres

D'autres études exposent des résultats avec les variations d'autres paramètres :

D'après Phuong *et al.* (2005), le virus survit plus longtemps dans une eau présentant des matériaux organiques (ici le test a été réalisé en ajoutant du lait aux trois échantillons). La présence de microorganisme de type flore microbienne réduirait le temps de survie de certains virus de grippe dans l'eau (Zarkov, 2006). L'intensité de l'exposition aux rayons ultra violets jouerait également un rôle important. (Brown *et al.*, 2007, Stallknecht *et al.*, 1990). On constate une stabilité des virus entre le pH5 et le pH8 (Martin, 2006). Mais l'acidification du milieu pourrait aussi diminuer le temps d'infectiosité des virus (Hinshaw *et al.* 1979, cité par Martin, 2006).

La situation de la crise de la grippe aviaire est à l'heure actuelle jugée préoccupante, de part la gravité de la maladie, mais aussi de part sa capacité à toucher des mammifères (OIE, 2008). Malgré les études réalisées, il est important de souligner ici que l'écologie de la grippe aviaire reste largement inconnue, notamment les mécanismes et les déterminants moléculaires de la persistance virale (Brown *et al.*, 2007).

L'utilisation de l'information géographique peut apporter de nouvelles données relatives à l'étude de l'émergence ou de la réémergence de la maladie et dans le cadre de la prévention de risques.

## II. L'utilisation de l'information géographique dans l'étude du virus de la grippe aviaire H5N1

### II.1. Apport de la télédétection

Il n'existe aujourd'hui que quelques études utilisant la télédétection dans le cadre de la grippe aviaire. Elles portent sur l'extraction d'indicateurs environnementaux et agricoles et notamment les types de rizières (une à plusieurs récoltes par an), les surfaces inondées et les températures de surfaces (lien avec les migrations d'oiseaux sauvages) à partir d'image MODIS à moyenne résolution.

La forte association entre les rizières et la présence de canards, facteur de risque de la transmission du H5N1 en Thaïlande, met en évidence l'intérêt de l'utilisation de la télédétection pour la cartographie des zones à risque :

Les rizières étant un mélange entre eau libre et végétation, Xiao *et al.* (2005) ont mis au point une approche fondée sur une analyse de la variabilité temporelle d'indices spectraux sensibles à la fois à l'eau et à la végétation pour la détection de ces rizières à partir d'images MODIS (voir détails §III.3).

Gilbert *et al.* ont de cette manière cartographié en Asie du sud est les zones de rizières en les associant avec des données épidémiologiques. Les résultats montrent qu'il existerait un lien étroit entre les schémas de parcours des canards (et donc la probabilité de cas de grippe aviaire) et l'intensité de la riziculture (nombre de récoltes par an).

Dans une autre étude, Xiao *et al.* (2006) utilisent aussi des images MODIS pour cartographier les températures de surface de l'écorégion paléarctique car les températures de surface sont une variable environnementale reconnue dans l'explication des migrations d'oiseaux. Ils utilisent le produit MODIS LST (Land Surface Temperature), issu d'un algorithme utilisant sept bandes de l'infrarouge thermique. Ils peuvent ainsi délimiter des vagues de déplacements des températures, notamment les gelées (déterminant pour la migration des oiseaux) et les vagues de chaleur (températures supérieures à 30°C) qui est un facteur déterminant pour la survie du virus dans l'environnement.

Les mêmes auteurs (2007) reprennent leurs précédentes études relatives aux dynamiques climatiques et paysagères en Thaïlande et soulignent l'importance des outils de technologie géospatiale pour identifier les points à risques et les périodes à risques.

Ils évoquent même l'importance de l'imagerie satellite pour identifier les dynamiques temporelles de température de l'eau 'facteur dans la survie du taux de virus H5N1 dans les masses d'eau'.

Guo *et al.* (2005) quant à eux ont travaillé sur des cas de grippe aviaire survenus dans une province du sud-est de la Chine (province d'Anhui) en 2004, dans le delta de la rivière Yangtze. Ils utilisent aussi des images MODIS pour produire une carte des températures de surface en appliquant un algorithme de Xue *et al.* reprenant les bandes 29 (8.4-8.7µm), 31 (10.78-11.28µm) et 32 (11.77-12.27µm). Il semblerait ainsi que les cas de H5N1 surviennent le plus souvent dans les zones présentant les températures les plus hautes (LST obtenue grâce à leur algorithme).

La télédétection constitue ainsi un outil intéressant dans le cadre d'études sur la grippe aviaire, par l'apport de nombreuses informations quant à l'occupation du sol, aux temps d'inondation, aux températures etc. Il faut également souligner l'importance de l'utilisation de logiciels de traitements de données spatiales pour croiser les informations et confronter les données spatiales (images notamment) à d'autres types de données (statistiques nationales ou autres).

## II.2. Analyses des corrélations entre données épidémiologiques et environnementales : apport des SIG.

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont utilisés dans les études suivantes pour identifier les zones présentant des cas de grippe et ainsi mettre en évidence l'ampleur et la répartition de la maladie. Cette répartition peut varier dans l'espace et dans le temps suivant les vagues d'épidémie et il peut être alors intéressant de croiser les données épidémiologiques avec des données de type environnemental ou agricole afin d'identifier des facteurs de risque d'apparition de la maladie.

Dans une étude chinoise (Beijing Institute of Microbiology and Epidemiology), les données épidémiologiques ont ainsi été croisées avec plusieurs types de données : données relatives à la population, données hydrologiques, données climatiques et météorologiques (température, etc.), données sur l'occupation et l'usage des terres, données écologiques concernant les voies migratoires et données relatives à la végétation. Les sources de ces données sont variées et font appel notamment à des bases de données statistiques nationales et à des traitements d'images satellitales. Les résultats montrent une corrélation entre le nombre de cas et les régions de températures entre 5°C et 15°C. On note aussi une corrélation entre les cas de grippe et la proximité aux rivières/fleuves, lacs ou mares : 95% des cas se situent en moyenne à 17.4 km des masses d'eau.

Guo *et al.* (2005) montre la relation entre la proximité des rivières et les cas de grippe (H5N1) en Chine pendant la période du 31 janvier au 10 février 2005 : 80% des aires infectées par la maladie se situent à moins de 50 kilomètres d'une rivière. Les conclusions de leur étude montrent que la prévalence du virus H5N1 est liée à la proximité à l'eau (en plus de la température de surface, cf. §II.1).

Gilbert *et al.* (2007) associent des données du ministère de l'agriculture thaïlandais telles que des statistiques sur le riz (croisées avec des données issues de l'imagerie satellitale : intensité des récoltes) avec des densités de fermes et de canards, et mettent en évidence une forte corrélation entre les productions de riz et le nombre de canards.

Les mêmes auteurs, en 2008, analysent les associations statistiques entre la présence du virus H5N1 et cinq variables environnementales : l'altitude, la population, le nombre de poulets, le nombre de canards, et l'intensité des récoltes de riz pour trois vagues d'épidémie entre 2004 et 2005 au Vietnam et en Thaïlande.

Les résultats montrent que le risque de grippe pourrait être lié avant tout à la population humaine, à l'intensité de la riziculture, puis à l'abondance de canards.

Un modèle statistique de risque a été mis au point à partir de la deuxième vague d'épidémie en Thaïlande. Il associe les cinq variables environnementales citées précédemment pour définir le risque de prévalence du virus. Le modèle donne des résultats satisfaisants lorsqu'il est extrapolé au Vietnam et il semble applicable au Cambodge et au Laos, qui présentent des conditions agro écologiques similaires. Le risque est défini comme la probabilité d'observer un cas de grippe aviaire dans une zone à un temps donné suivant plusieurs facteurs identifiés comme des « facteurs de risque ».

Le modèle statistique permet de calculer une valeur de probabilité d'apparition d'un cas de grippe pour chaque pixel de 500m × 500m, et ainsi de cartographier le risque d'apparition de cas de grippe sur l'ensemble de la zone (Asie du sud-est).

La variabilité spatiale du risque de grippe ne peut pas être expliquée par le seul modèle. Gilbert *et al.* précisent qu'il faudrait prendre en compte d'autres facteurs comme les divers systèmes de production de volailles terrestres, le rôle des marchés inondés, les contacts avec l'avifaune migratrice et locale, et les conditions qui influencent la survie du virus dans l'environnement.

Tous ces travaux, utilisant les outils de la géomatique, et plus particulièrement la télédétection, ont porté essentiellement sur la distribution des hôtes (volailles et oiseaux sauvages), par la localisation et l'analyse de leur milieu de vie.

Il peut être intéressant de se pencher sur la caractérisation des zones en eau où le virus peut potentiellement survivre, et notamment sur les types d'eau (eau permanente ou non) et leurs caractéristiques.

Dans la partie suivante, nous tentons ainsi de faire un bilan des travaux de télédétection portant sur la détection de l'eau puis la caractérisation des propriétés de l'eau déterminantes pour la survie du virus : température et deux paramètres secondaires pouvant influencer la température : la turbidité et la profondeur. La salinité est exclues car elle est uniquement détectable dans les mers et les océans, et le pH est aussi exclu car non détectable. (cf. I.4.).

### III. Les propriétés de l'eau par télédétection

Nous traitons ici des caractéristiques de l'eau détectables par des capteurs satellitaires ou aéroportés en insistant particulièrement sur l'apport des données optiques à basse résolution spatiale de type MODIS (données utilisées pour étude ultérieure sur les facteurs de risque pour la survie du virus dans l'environnement).

Trois parties composent ce paragraphe, une première décrivant la détection de l'eau de manière générale, une deuxième portant sur la détection des surfaces inondées, et enfin une dernière partie faisant l'état de l'art sur la caractérisation de propriétés de l'eau qui pourraient avoir un lien avec la survie du virus de grippe aviaire H5N1 : la température, la profondeur et la turbidité (ces deux indices étant des indices secondaires pouvant influencer la température de l'eau).

#### III.2. Détection de l'eau libre

Plusieurs méthodes sont utilisées en télédétection pour délimiter les masses d'eau. Ces méthodes reposent sur l'utilisation de la radiation solaire réfléchie, la radiation thermique émise ou la rétrodiffusion active de micro-ondes (radar).

Les méthodes reposant sur la réflexion de la radiation solaire ont été étudiées depuis plusieurs décennies par des chercheurs qui ont utilisé des bandes uniques de longueurs d'onde ou des ratios de bandes afin de détecter la présence d'eau et de délimiter les masses d'eau.

Les méthodes radar sont elles aussi utilisées depuis plusieurs décennies, mais ont été malgré tout beaucoup moins exploitées.

##### *III.2.1. La télédétection passive : la réflectance de l'eau pure dans le visible et le proche infrarouge*

La télédétection passive utilise des capteurs qui peuvent percevoir l'énergie renvoyée par la surface terrestre, lorsque le soleil éclaire la Terre, dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge. La détection est uniquement possible en journée, sauf pour l'infrarouge thermique, c'est alors l'énergie dégagée par la surface terrestre qui est enregistrée.

Le rayonnement<sup>1</sup> solaire incident sur une surface d'eau pure est réfléchi dans toutes les longueurs d'onde du spectre visible avec un pic pour les plus petites longueurs d'onde. L'intensité de la réflexion<sup>2</sup> varie néanmoins selon la position du soleil et l'angle suivant lequel la surface est observée. L'énergie qui n'est pas réfléchie est réfractée<sup>3</sup> vers le bas et une partie du flux réfracté est absorbé<sup>4</sup> par l'eau et l'autre partie est rétrodiffusée<sup>5</sup> (voir figure ci-après).

Ainsi, la luminance<sup>6</sup> détectée par les capteurs de télédétection est une combinaison de la luminance due à la réflexion de la surface, la luminance dispersée dans l'eau, et la luminance due à la réflexion du fond.

<sup>1</sup> **Rayonnement électromagnétique** : Énergie qui se propage dans l'espace ou dans la matière sous forme de champs électriques et magnétiques perpendiculaires entre eux.

<sup>2</sup> **Réflexion** : Réflectance de l'énergie électromagnétique, sans diffusion, par une surface lisse par rapport à la longueur d'onde de l'énergie incidente.

<sup>3</sup> **Réfraction** : Inflexion des rayons électromagnétiques lors de leur passage d'un milieu à un autre ayant un indice de réfraction différent (constante diélectrique différente).

<sup>4</sup> **Absorption** : Réduction de puissance d'une onde électromagnétique se propageant dans un milieu.

<sup>5</sup> **Rétrodiffusion** : En télédétection optique, on fait souvent référence à la direction de rétrodiffusion. Cette direction correspond à celle de la réflexion dans la direction générale de la source d'éclairage (le soleil par exemple).

<sup>6</sup> **Luminance** : Mesure de l'énergie rayonnée par un objet et de sa distribution en fréquence.

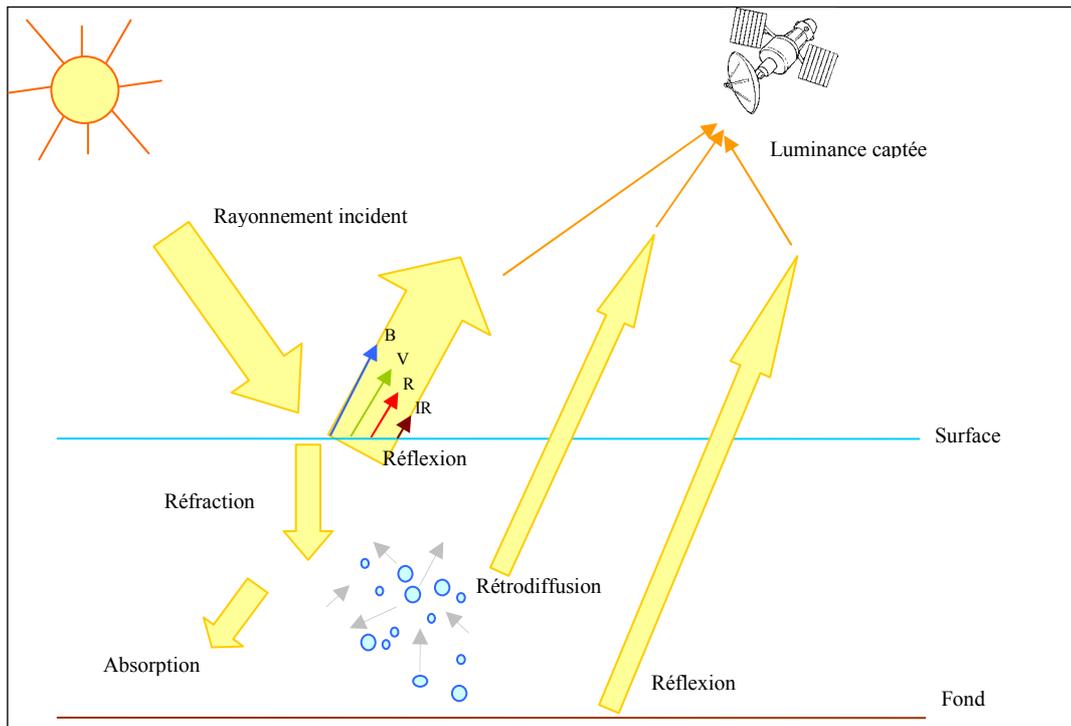


Figure 4. — Rayonnement incident et luminance de l'eau captée.

La réflectance de l'eau pure est assez forte dans la bande bleue du visible, diminue ensuite rapidement pour devenir très faible dès le proche infrarouge (cf. figure 2). En effet, il y a diffusion de la lumière par les molécules d'eau et les corps dissous (la diffusion de Rayleigh), qui joue un rôle important uniquement dans les courtes longueurs d'ondes (couleur bleue). Par contre, quelques centimètres suffisent pour absorber tout le rayonnement solaire dans le proche infrarouge ( $0,7\mu\text{m}$  à  $1,4\mu\text{m}$ ) et le moyen infrarouge ( $1,5\mu\text{m}$  à  $3\mu\text{m}$ ). L'eau apparaît donc noire dans ces longueurs d'onde. (Guyot 1989).

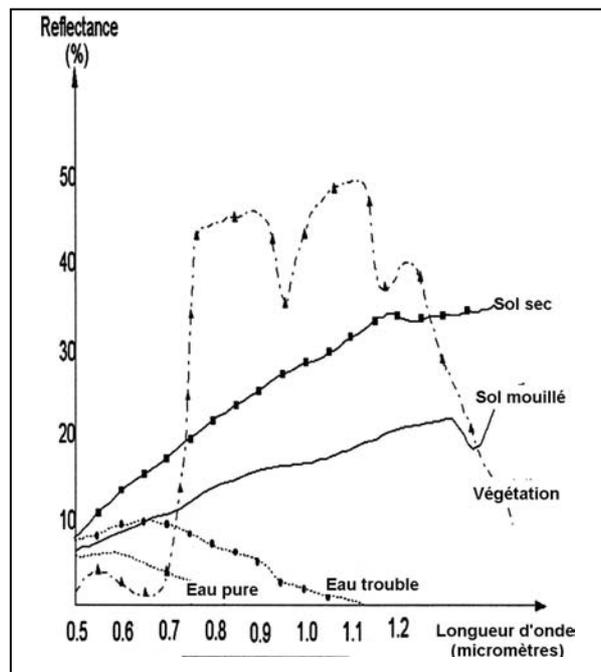


Figure 5. — Réflectance de l'eau et d'autres types de surface dans différentes longueurs d'onde.

Source : Centre Météorologique Satellite National, Pékin, Chine

Au final, la réflectance observée dépendra des propriétés physiques, chimiques et biologiques de l'eau, des ondes de surface, de la profondeur de l'eau, des caractéristiques du fond, des propriétés de diffusion de la radiancie du ciel, de la géométrie de la position du soleil, et de la direction de la vision. (Seyhan E. 1986)

Le tableau 2 détaille les indices permettant de détecter l'eau rencontrés dans la littérature scientifique, en précisant le calcul, le contexte d'utilisation original et les capteurs utilisés. Les ratios de bandes ont pour objectif de maximiser la réflectance de l'objet étudié (ici l'eau) et de minimiser la réflectance des autres surfaces. Les indices seront testés et discutés pour l'application au terrain de la présente étude.

Rapport-Gratuit.com

Type, nom De l'indice	Ratio	Capteur (et résolution spatiale )	Contexte d'utilisation	Source	Application aux images MODIS
NIR	/	Photographies infrarouge	Détection de l'eau. Le proche infrarouge est fortement absorbé par l'eau (qui agit alors comme un corps noir) et est réfléchi par les autres surfaces, notamment la végétation et les sols secs (ces surfaces apparaissent en blanc et l'eau en noir).	Work and Gilmer, 1976 ; White, 1978 ; Rundquist <i>et al.</i> 1987	B2
NDVI <i>Normalized difference vegetation index</i> EVI Enhanced vegetation index	(PIR-Rouge)/(PIR+Rouge)	TM (Landsat) (30 m)	On utilise l'infrarouge et le rouge car la végétation a une réponse forte dans l'infrarouge et faible dans le rouge, de plus les autres surfaces comme l'eau ont des faibles valeurs dans les deux bandes. L'indice présente des valeurs positives pour la végétation, des valeurs proches de zéro pour les sols nus et des valeurs négatives pour l'eau. Evaluation de la biomasse et de la production primaire.	Townshend and Justice, 1986 ; Tucker and Sellers, 1986	(B2-B1)/(B2+B1)
NDWI <i>Normalized difference water index</i>	(Vert-PIR)/(Vert+PIR)	TM (Landsat) (30 m)	Le NDWI est dérivé du NDVI. Délimitation des masses d'eau : l'indice permet de maximiser la réflectance de l'eau en utilisant les longueurs d'onde du vert, à minimiser la réflectance des masses d'eau en utilisant le proche infrarouge et inversement à maximiser la réflectance de la végétation et du sol dans le proche infrarouge (les masses d'eau ont des valeurs positives, la végétation et les sols ont des valeurs nulles ou négatives.) L'indice peut également être utilisé pour détecter la turbidité (présence de sédiments en suspension ou de chlorophylle-a)	McFeeters.S.K 1996	(B4-B2)/(B4+B2)
NDII <i>Normalized Difference Infrared Index</i> NDWI <i>Normalized difference water index</i> NDMI <i>Normalized difference moisture index</i> LSWI <i>Land surface Water Index</i>	(PIR-MIR)/(PIR+MIR)	TM (Landsat) (30 m) MODIS (Terra) (500m) Spot végétation	Initialement, Hardisky <i>et al.</i> ont montré la corrélation des valeurs de l'indice NDII avec le contenu en eau de la canopée. Puis d'autres auteurs ont mis en évidence la corrélation entre les valeurs de l'indice et le contenu en eau de la végétation et du sol. (Elvidge and Lyon, 1985; Musick and Pelletier, 1986, 1988)  Le NDWI Gao (MODIS) et le NDMI de Wilson (2002) permettent de détecter l'humidité des sols, ils sont utilisés initialement pour détecter l'eau dans la végétation (contenu en eau des feuilles)  LSWI (MODIS), de Xiao pour l'humidité des sols, au début appelé NDVI <sub>igt</sub> et utilisé sur des images SPOT vegetation.	Hardisky <i>et al.</i> 1983 Gao, 1996 Wilson <i>et al.</i> , 2002 Xiao <i>et al.</i> , 2005	B2-B5/B2+B5 (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2003) B2-B6/B2+B6
MNDWI <i>Modified normalised difference water index</i>  NDPI <i>Normalized difference Pond index</i>	(Vert-MIR2)/(Vert+MIR2)  (MIR2-Vert)/(MIR2+Vert)	TM (Landsat) (30 m)  Spot	Le NDWI de Mcfeeters a été modifié par l'utilisation du Moyen infrarouge au lieu du proche infrarouge. L'indice permet de mettre en évidence les masses d'eau en supprimant de manière plus efficace que le NDWI le bruit des terrains bâti, ainsi que celui de la végétation et du sol. Les masses d'eau sont ainsi mieux délimitées (plus de détails), par discrimination efficace des surfaces en eau et des surfaces sèches. Le seuil de discrimination est situé autour de 0. Le NDPI a été utilisé pour la détection des mares et ruisseaux de moins de 0.01 ha et différenciation de la végétation des mares au Sénégal.	Xu 2006  Lacaux, 2006	B4-B6/B4+B6  B6-B4/B6+B4

Tableau 2. — Indices pour détecter l'eau.

### III.2.1. La détection de l'eau libre par radar

Le terme radar est un acronyme pour *radio detection and ranging* (*détection et télémétrie par ondes radio*). Le radar fait partie de la catégorie des capteurs actifs, c'est-à-dire que le signal analysé provient de l'onde émise par le capteur qui est ensuite renvoyée par la surface.

Ces capteurs présentent l'avantage de pouvoir enregistrer des informations par tous temps, c'est-à-dire indépendamment de la présence de nuages et de jour comme de nuit. De plus, le radar peut apporter des informations complémentaires à la télédétection par capteurs optiques.

La résolution spatiale des images s'étend de 1 mètre à 1 kilomètre et est proportionnelle à leur taille. Celle-ci peut varier de 10 km × 10 km à 500 km × 500 km. La télédétection par radar utilise une portion du spectre électromagnétique de 1 mm à 1 m, ce sont les hyperfréquences ou micro-ondes :

- Bande-P : 30 à 100 cm
- Bande-L : 15 à 30 cm
- Bande-S : 7,5 à 15 cm
- Bande-C : 3,75 à 7,5 cm
- Bande-X : 2,4 à 3,75 cm
- Bande-Ku : 1,1 à 1,67 cm
- Bande-Ka : 0,75 à 1,1 cm
- Bande millimètre
- Bande secondaire de millimètre

Les bandes les plus utilisées sont les Bandes X (très utilisée dans les systèmes radars aéroportés pour la reconnaissance militaire et la cartographie) et C (répandue dans plusieurs systèmes aéroportés et spatioporté).

Le signal radar, qui est une onde électromagnétique, est caractérisé par trois paramètres principaux :

- l'angle d'incidence
- la polarisation (orientation des ondes émises et reçues, horizontale (H) et verticale (V))
- la fréquence (la longueur d'onde du radar)

Selon ces paramètres, il est possible d'analyser le signal radar reçu et ainsi de déterminer l'occupation du sol.

Généralement, pour l'eau libre sans végétation, surface considérée comme lisse, le signal capté est faible. Ceci s'explique par la réflexion spéculaire de l'onde reçue par la surface. En effet, les ondes incidentes sont réfléchies en quasi totalité dans une direction opposée. L'eau apparaît donc en foncé sur les images.

La bande C, avec une simple polarisation, permet de détecter efficacement l'eau libre (Smith, 1997).

Dans une étude portant sur la définition du trait de côte au Gabon, Baghdadi *et al.* (2007) ont défini les configurations idéales permettant de discriminer l'eau des terres (capteur ASAR-ENVISAT, bande-C):

- si l'angle d'incidence est faible, la polarisation doit être croisée (HV/VH)
- si l'angle d'incidence est fort, toutes les polarisations sont utilisables (croisées et parallèles – HH/VV).

Ainsi, la télédétection active permet de nombreuses applications en hydrologie, et notamment pour la détection des masses d'eau, des cours d'eau, l'humidité du sol, le suivi des inondations etc.

Les indices en télédétection passive doivent être testés et peuvent être plus ou moins adaptés à la détection de l'eau selon les caractéristiques propres à chaque terrain d'étude. Quelques méthodes fondées sur la variation de la valeur d'indices permettent de mettre en évidence les surfaces sujettes aux inondations. (cf. III.3)

La télédétection radar peut apporter des informations complémentaires, voire elle peut s'avérer plus efficace que la télédétection passive dans certaines zones pour détecter les surfaces en eau.

### III.3. Détection des surfaces inondées

#### III.3.1. La détection des surfaces inondées par télédétection passive

##### III.3.1.1. Les inondations

Sakamoto *et al.* (2007) ont étudié les variations temporelles de l'étendue des inondations annuelles dans le delta du Mékong au Vietnam et au Cambodge. À partir de synthèses à 8 jours proposées par MODIS, ils ont analysé les profils temporels des indices EVI, LSWI, et de la différence entre EVI et LSWI, appelé DVEL sur une année.

Un arbre de décision est proposé afin de produire des séries chronologiques de cartes d'inondation pour les cinq saisons d'inondation annuelle entre 2000 et 2004. À partir du seuillage d'indices et de la variation de leur valeur, les images sont classées suivant quatre modalités : non inondés, mélange eau/végétation, inondés, eau permanente. On produit alors une cartographie spatio-temporelle des inondations dans le Delta du Mekong. Les éventuelles erreurs de classification sont relatives aux dates de début et de fin d'inondation mais aussi aux confusions liées à la sous estimation de l'inondation sous une épaisse couverture végétale par exemple (c'est le cas au nord du lac Tonlé Sap au Cambodge).

Zhan *et al.* (2002) ont créé un algorithme VCC (vegetative cover conversion), dérivé des deux bandes MODIS rouge et proche infrarouge à 250m de résolution spatiale. Il permet de détecter les changements d'occupation du sol c'est-à-dire que suivant la nature du pixel de départ et celui d'arrivée, le type de changement est identifié : déforestation, incendie, inondation, urbanisation, ou à l'inverse reconquête de la végétation, retrait de l'inondation, expansion de l'agriculture.

Pour détecter puis cartographier les zones inondées dans des régions fortement végétalisées, comme au Cambodge, on utilise la méthode de vecteur de changement (identification des vecteurs suivant la position des pixels dans l'espace rouge-infrarouge au départ et à l'arrivée) et la méthode de partitionnement de l'espace rouge –infrarouge (classification des objets suivant leur réponse spectrale dans le rouge et l'infrarouge). Les deux méthodes offrent des résultats similaires et permettent d'affirmer que le 15 septembre 2001, l'inondation au Cambodge recouvre 7% de la superficie du pays

##### III.3.1.2. Les rizières

Xiao *et al.* (2005) ont analysé les profils temporels d'indices (NDVI, normalized difference vegetation index) – LSWI, Land Surface water index – EVI, enhanced vegetation index) sensibles à la fois à l'eau et à la végétation et calculés à partir de données MODIS- afin de détecter les rizières et le nombre de récoltes par an. Les valeurs des indices varient sur une année, depuis l'inondation jusqu'à la couverture par la végétation des rizières. En effet, durant l'inondation on observe une inversion temporaire de la valeur des indices, où le LSWI (sensible à l'eau) atteint ou dépasse les valeurs de NDVI et de EVI (sensibles à la végétation). Cette caractéristique permet de délimiter les rizières et de compter le nombre de récoltes par an.

#### III.3.2. La détection des surfaces inondées par télédétection active (radar)

##### III.3.2.1 Les inondations

La présence de végétation ou de vent induit une moins bonne détection de l'eau, due à la rugosité. En effet, en présence de végétation ou de vent, les surfaces en eau apparaissent moins lisses, le signal renvoyé vers le capteur est alors plus fort. Les plus grandes longueurs d'ondes permettent une plus grande pénétration, ainsi la bande L permet de traverser la canopée d'une forêt inondée. Comme le souligne Smith (1997), l'utilisation de plusieurs fréquences permet de discriminer plusieurs types de terrains inondés. Ainsi, Hess *et al.* (1994, 1995) ont pu détecter des surfaces inondées, des surfaces en eau, et de la végétation inondée dans le bassin amazonien grâce à l'utilisation des bandes C et L.

Une autre méthode est proposée par Baghdadi *et al.* en 1999, qui ont pu discriminer des zones humides en utilisant un arbre de décision reposant sur le seuillage de la valeur du coefficient de réflexion pour différentes polarisations dans la bande C. Ils ont ainsi réussi à discriminer différents

types d'occupation du sol : marais, eau libre, déboisement, tourbières boisées, forêt, et tourbières non forestières.

Frappart *et al.*, en 2005, ont utilisé des données provenant du capteur JERS-1, du satellite d'altimétrie Topex/Poseidon et des données *in situ*. Les données radar ont été analysées afin de cartographier l'eau libre, les zones inondées et les forêts. Le radar altimétrique et les données *in situ* ont permis quant à elle de fournir des informations sur les niveaux d'eau.

Martinez *et al.*, en 2006 ont utilisé des séries temporelles d'images radar provenant du capteur JERS (bande-L) afin de cartographier l'inondation et la distribution spatiale de la végétation dans la plaine d'inondation de l'Amazonie. Les auteurs ont montré que l'analyse de la variation temporelle de la rétrodiffusion radar permet de délimiter efficacement l'étendue de l'inondation, et de discriminer les surfaces lisses (sols nus / masses d'eau). Ils ont utilisé des règles de décisions, à partir du calcul du coefficient de rétrodiffusion, et d'un estimateur de changement absolu. Ce dernier repose sur un algorithme développé par Quegan et Le Toan (1998) qui calcule le logarithme du ratio entre la valeur de l'intensité à une date et la valeur de l'intensité aux autres dates.

Quelque temps auparavant, une méthode utilisant aussi l'analyse de la variation de la valeur de la rétrodiffusion avait été utilisée par Pope *et al.* (1997) pour détecter l'eau sous la végétation en Amérique centrale (bande L- et C- du capteur SIR-C). Ainsi, une augmentation de l'inondation dans les marais est caractérisée soit par une augmentation de la rétrodiffusion dans les marais haut présentant une couverture dense, soit par une diminution de la rétrodiffusion dans les marais bas avec une couverture peu dense, soit par une augmentation de la phase dans tous les types de marais.

### III.3.2.2. Les rizières

En 1998, Ribbes et Le Toan ont cartographié des zones de rizières en Indonésie grâce à des images issues du capteur RADARSAT. La cartographie s'appuie sur l'analyse de la variation de la valeur du coefficient de rétrodiffusion à partir de données enregistrées avec une polarisation parallèle et un fort angle d'incidence. En effet, la rétrodiffusion varie significativement au cours des différents stades végétatifs des plants de riz.

Panigrahy *et al.*, en 1999, ont travaillé à partir d'images RADARSAT (Bande-C, polarisation HH) pour identifier les zones de culture du riz et les zones de culture de la pomme de terre dans la plaine du Gange, au Bengale occidental. Les résultats montrent qu'au moins deux dates (choisies précautionneusement selon la croissance de la culture) sont nécessaires pour identifier efficacement le type de culture. En ce qui concerne les rizières, la rétrodiffusion serait moins importante durant l'inondation des rizières, et elle augmenterait avec la croissance des plants de riz. Pour la pomme de terre, la rétrodiffusion varie peu au moment de la croissance, et montre une importante variation au début du stade végétatif.

Shao *et al.* en 2000, ont pu détecter des zones de rizières en Chine et ont identifié des types de riz suivant leur espérance de vie (de 80 à 120-125 jours) grâce à l'analyse de séries temporelles d'images issues du capteur RADARSAT. Un modèle empirique a ensuite été construit en mettant en relation la valeur de rétrodiffusion et l'espérance de vie du riz (celle-ci permet de prévoir la production).

En télédétection passive et active, la détection des surfaces inondées et notamment des rizières s'appuie le plus souvent sur l'utilisation de séries temporelles. En effet, l'analyse repose sur la détection des changements, grâce à l'analyse de la variation de valeurs d'indices (télédétection passive) ou de valeurs de rétrodiffusion (celle-ci étant conditionnée par l'utilisation de paramètres adéquats : polarisation, longueurs d'onde, angle d'incidence)

Les capteurs actifs présentent l'avantage de pouvoir s'affranchir des contraintes liées à la présence de nuages, et de détecter les surfaces inondées, même en présence de végétation. En effet, comme le rappellent Martinez *et al.* en 2006 (d'après Hess *et al.*, 1995 ; Hess *et al.*, 1990 et Le Toan *et al.*, 1997), la télédétection radar est bien adaptée à l'étude des écosystèmes tropicaux grâce à sa capacité à enregistrer des informations par tous temps et parce que les données radar sont sensibles à la biomasse et à la structure de la végétation inondée.

Dans le cadre de la problématique de la survie du virus H5N1 dans l'eau, la détection des zones en eau pourrait être précisée par la discrimination des types d'eau, suivant leurs caractéristiques.

Celle-ci s'appuie essentiellement sur l'analyse de données provenant de capteurs passifs.

### III.4. Influence des propriétés de l'eau sur sa signature spectrale

Suivant les propriétés physiques et chimiques de l'eau (comme la transparence, la température, la charge etc.) la réponse spectrale dans certaines bandes peut varier. Par exemple, plus la concentration en sédiment dans l'eau est importante, plus la réflectance est importante dans le canal 600-700 nm (rouge). (Guyot 1989)

Dans la télédétection passive des masses d'eau (capteurs optiques), le signal mesuré dans le visible et le proche infrarouge est fait de 90 à 98% des contributions de l'atmosphère et de la surface de l'eau. De plus, la profondeur de pénétration du rayonnement dans l'eau dépend de la longueur d'onde et des propriétés d'absorption de la masse d'eau ; en effet seules les longueurs d'onde du visible pénètrent dans la masse d'eau.

Par conséquent, toute estimation quantitative des propriétés de l'eau dépend de la capacité à récupérer la partie du signal émanant de la masse d'eau, de la complexité de cette dernière, et de la mise au point d'un algorithme performant (Durand 1999).

Malgré ces difficultés, une revue de la littérature montre qu'il est possible de détecter plusieurs types de paramètres :

- constituants de l'eau (chlorophylle-a, sédiments en suspension non organiques, matière organique colorée dissoute (substance jaune)).
- propriétés optiques de la colonne d'eau.
- température de surface.
- paramètres en relation avec la profondeur : bathymétrie, topographie du fond, niveau d'eau.
- morphométrie : longueur, forme, aire etc. de la masse d'eau.

En relation avec la problématique de la grippe aviaire, nous nous intéressons ici essentiellement à la caractérisation par télédétection de la température de l'eau, la profondeur, et à la turbidité (cf. §1.4).

#### III.4.1. La turbidité

La turbidité désigne le caractère trouble d'un liquide. Elle est causée par des particules en suspension qui absorbent, diffusent ou réfléchissent le rayonnement solaire. Elle peut traduire une teneur importante en matières fines ou colorantes en suspension (acide humique ou fulvique, particules provenant de la dégradation des végétaux ou de l'érosion du sol), un taux élevé de plancton, ou encore une pollution ou une eutrophisation de l'eau (rejets industriels, agricoles ou urbains)

La couleur de l'eau, liée à la nature des matières en suspension a un impact sur la température de l'eau (un liquide foncé absorbe mieux la chaleur), mais aussi sur son évaporation et donc sur sa salinité. Des particules minérales, du plancton ou des végétaux, en suspension ou flottant dans l'eau, modifient les caractéristiques spectrales de l'eau en augmentant la réflectance dans le visible voire dans le proche infrarouge pour certains sédiments en suspension.

On trouve dans la littérature scientifique deux groupes d'indicateurs de turbidité (voir tableau 3):

- Les indicateurs empiriques : ils sont calibrés et testés grâce à des données in situ. On extrait alors les valeurs de turbidité à partir des images grâce à des relations statistiques.
- Les indicateurs théoriques : ils révèlent la turbidité de chaque pixel relativement aux autres par l'utilisation d'une bande ou par combinaison de bandes.

### III.4.1.1. Indicateurs empiriques

Une approche a été développée par Dekker en 1993 pour quantifier la turbidité à partir d'images provenant de capteurs hyperspectraux aéroportés (CAESAR et CASI).

Après correction atmosphérique, la turbidité des lacs et fleuves étudiés est extraite par la relation statistique existante entre les ratios de réflectances (longueurs d'ondes 705 nm et 676 nm) et la turbidité mesurée grâce au disque de Secchi (on plonge un disque dans l'eau et on note à quelle profondeur on ne le voit plus, c'est un moyen simple pour évaluer la transparence de l'eau).

Giardino *et al.* (2001) utilisent la même méthode pour estimer la turbidité du lac Iseo en Italie et notent une corrélation entre la valeur du disque de Secchi et les réflectances dans les bandes TM1 et TM2 ( $R^2 = 0,85$ ) de Landsat.

La turbidité est également étudiée en milieu côtier à partir de données à résolution plus grossière (MODIS, moyenne résolution). Chen *et al.* (2007) ont travaillé sur la turbidité dans la baie de Tampa aux Etats-Unis. Ils ont utilisé les données MODIS du satellite Aqua dont les bandes ont une sensibilité suffisante pour détecter un panel de couleurs dans les eaux des estuaires. Après diverses corrections et validations de terrain, une méthode bio-optique est utilisée pour convertir la réflectance en turbidité dans la région étudiée (la réflectance dans la bande 645 nm est corrélée à la turbidité).

### III.4.1.2. Indicateurs théoriques

Dans l'eau douce (lacs et rivières), qui contient généralement plus de sédiments, le spectre de réflectance est différent de celui des eaux marines. La réflectance est souvent plus importante dans le canal 600-700 nm (rouge) (Durand *et al.* 1999). Ce canal semble ainsi être une fenêtre spectrale intéressante pour la mise en évidence de matériaux en suspension, comme le souligne Seyhan (1989).

Un indice de turbidité a été mis au point et testé au début des années 1980 par Verdin *et al.* à partir des bandes TM et MSS de Landsat pour détecter la turbidité des eaux continentales (cf. tableau3).

Lacaux *et al.* (2007) utilisent des indices de végétation et de turbidité pour classifier les mares au Sénégal grâce à un arbre de décision et à partir d'images à haute résolution SPOT 5. Ils ont élaboré un indice de turbidité permettant de faire ressortir les mares suivant leur degré de turbidité.

Härmä *et al.* (2001, Finlande) ont créé des indices basés sur les bandes du capteur MERIS ; MODIS et TM et les ont comparés. Pour les trois capteurs, ils ont trouvé une bonne corrélation entre les valeurs estimées de la turbidité de lacs en Finlande et les valeurs mesurées.

Dans le tableau 3 sont regroupés tous les indices qui permettent de détecter la turbidité par combinaisons de bandes (calculs d'indices applicables à d'autres types de terrain) et certaines méthodes empiriques qui pourraient être adaptées.

Calcul/ Indice	Capteur (satellite)	Type (empirique:E/ théorique : T)	Application	Source	Application aux images MODIS (bande)	
$Turbidité = 1203.9 * Rrs(645)1.087$	MODIS (Aqua)	E	Turbidité de la baie de Tampa (États-Unis)	Z.Chen <i>et al.</i> 2006	/	
$SD = 8.01pTM1/pTM2 - 8.27$ Où pTM1 et pTM2 sont les réflectances corrigées atmosphériquement dans les canaux TM1 et TM2 de Landsat TM	TM (Landsat )	E	Turbidité du lac Iseo en Italie	Giardino <i>et al.</i> 2001	/	
600-700 nm (rouge).	/	T		Durand <i>et al.</i> 1999	B1	
$MSS4 / (MSS4 + MSS5 + MSS6)$ $TM2 / (TM2 + TM3 + TM4)$	MSS(Landsat) TM (Landsat )	T	Turbidité des eaux continentales (réservoirs à l'ouest des États-Unis)	Verdin, 1982, 1985.		
$NDTI = (DCsRED - DCsGREEN) / (DCsRED + DCsGREEN)$ NDTI : Normalized Difference Turbidity Index	Spot5	T	Turbidité de mares (Afrique de l'ouest)	Lacaux <i>et al.</i> 2006	(B1-B4)/ (B1+B4)	
Type turbidité Turbidité lacs Turbidité côtes Turbidité lacs et côtes	MERIS L705-L754 L620-L775 L705-L754	MODIS (L488-L748)/(L667-L748) L667-L748 (L488-L748/L667-L748)	TM (TM1-TM4)/(TM3-TM4) TM3-TM4 TM1/(TM1+TM2+TM3)	MERIS, MODIS, TM	T	Turbidité de lacs en Finlande Härmä <i>et al.</i> 2001

Tableau 3. — Indices de turbidité.

### III.4.2. La température

« La température de surface mesurée par des capteurs spatiaux est représentative de l'interface eau / atmosphère. La température estimée par télédétection peut être plus ou moins représentative de la surface (cas le plus fréquent), de la masse, ou de l'air à proximité de la surface, en fonction de la mer, des vents et de la rugosité de la bande spectrale utilisée pour effectuer l'observation (IR ou micro-ondes) » (Durand *et al.*, 1999)

D'après leur résolution spatiale, il serait possible d'utiliser des images MODIS pour déterminer la température de lacs suffisamment grands. Ainsi, Anu Reinart *et al.* (2008) ont déterminé les températures de surfaces de grands lacs en Suède en utilisant des produits MODIS. Les données issues du produit MODIS SST montreraient une bonne corrélation avec les mesures de températures in situ. Elles permettent d'étudier les variations spatiales et saisonnières des températures de surface des lacs. Ces données ne pouvant être obtenues par une autre méthode, elles sont appropriées pour les océans, ou les très grands lacs (résolution spatiale de la bande thermique : 1km).

Pour étudier des surfaces plus petites (lacs inférieurs à 3km de large), on peut utiliser des données Landsat. Les données thermiques ont une résolution spatiale de 100 mètres et 60 mètres. (Landsat 5 ou 7 ETM+). Wloczyk *et al.* 2006 utilisent ainsi une méthode mise au point à partir d'une bande simple Landsat 7 ETM+ et montrent des résultats plutôt satisfaisants, comparables à des modèles prévisionnels empiriques.

Certains auteurs ont travaillé sur le choix des images pour avoir une évaluation de la température de l'eau fiable. Handcock *et al.* (2006) évaluent ainsi la qualité des résultats de prévision des températures de cours d'eau de 10 à 500 mètres de large en utilisant plusieurs types d'image. Ils concluent que la fiabilité des satellites pour la mesure des températures des cours d'eau par télédétection infrarouge thermique est limitée aux grands fleuves (180 mètres et au-delà pour Landsat ETM+).

En effet, les cours d'eau sont beaucoup plus complexes à étudier que les lacs et les océans en télédétection du fait de leur morphologie (canaux tressés, îles, bancs pierreux, étroitesse, présence de végétation). Ils varient beaucoup selon leurs caractéristiques hydrologiques et hydrauliques (apports en eaux souterraines, profondeur de l'eau, vitesse, turbulence, fluctuation).

Pour déterminer la température de l'eau des rivières et des ruisseaux, on utilise exclusivement la télédétection aéroportée. On prévoit la température de l'eau grâce à un capteur qui détecte la radiation thermique (3-5 $\mu$ m et 8-14 $\mu$ m) de la couche supérieure de l'eau (0.1 mm).

Une étude a ainsi été réalisée à partir de données provenant de capteurs aéroportés (Torgersen, Faux *et al.* 2001) afin de déduire la température de rivières et ruisseaux ( de 5 à 27 °C) dans l'Oregon aux Etats-Unis. Les données sont enregistrées dans une bande de l'infrarouge thermique (8 à 12 $\mu$ m, la résolution spatiale est fine, de 20 à 40 cm).

Ainsi, la température de l'eau peut être obtenue grâce à des images ayant une résolution spatiale et spectrale adaptée. La qualité des données de température doit être évaluée relativement à la proximité à d'autres types de couvertures du sol et à la nature des pixels sous-jacents. De plus il faut noter que les corrections atmosphériques s'avèrent souvent nécessaires (Handcock, Gillespie *et al.* 2006).

### III.4.3. La profondeur

La télédétection radar et optique peut être utilisée pour extraire les paramètres en relation avec la profondeur. Les techniques de télédétection de bathymétrie sont basées sur l'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau, alors que les méthodes exploitant des données radar sont fondées sur le changement de rugosité de surface due à la topographie du fond, et les informations sur les courants locaux pour obtenir la bathymétrie (Durand *et al.*, 1999).

Quelques exemples sont pris dans la littérature pour détecter la profondeur selon les deux méthodes.

### III.4.3.1. Télédétection optique

Pour la télédétection optique, Lyznega *et al.*(1981), et Bierwirth *et al.*(1993) ont décrit un algorithme à partir de données Landsat TM. C'est un calcul semi-empirique dépendant des conditions locales, utilisant la réflectance dans le visible. Les auteurs soulignent les erreurs probables dues à une confusion avec la turbidité.

Wu *et al.* (2007) ont créé un modèle reposant sur la corrélation existant entre la réflectance des pixels dans la bande TM4 de Landsat et la profondeur de mares peu profondes en Chine. Le modèle offre des résultats intéressants, notamment pour les profondeurs inférieures à 2 mètres (erreur moyenne : 0.15 mètres, tandis que pour les profondeurs comprises entre 2 et 6 mètres, l'erreur moyenne est de 0.5 mètres)

### III.4.3.2. Télédétection radar

La profondeur de l'océan peut être détectée à partir d'images radar issue du capteur SAR (Forget, 1995). Les images fournissent une information relative à la rugosité de la surface. La profondeur est alors calculée grâce à un algorithme complexe employant les transformées de Fourier, et reposant sur la réfraction des ondes monochromatiques provenant du fond de la mer sur le plateau continental.

Alpers et Hennings (1984) travaillent à partir de données SAR pour déterminer la profondeur de la mer, grâce à une méthode de corrélation, mettant en relation l'intensité de l'image et la profondeur. Les auteurs précisent que les résultats sont exploitables de manière relative et non absolue.

La lecture non exhaustive de la littérature scientifique donne un aperçu des possibilités et des limites de la télédétection quant à l'extraction de paramètres de l'eau.

Ainsi il apparaît que le choix des images doit être bien pensé en amont, il doit être déterminé suivant l'échelle d'étude, les dimensions des objets, et les moyens mis en œuvre (humains, techniques et financier).

Il existe des méthodes empiriques pour extraire certaines caractéristiques qui sont difficiles à appliquer à d'autres terrains d'études car les conditions locales sont souvent bien spécifiques. En revanche, il peut être intéressant de tester les indices et les méthodes de corrélation élaborés par les différents auteurs, voire de les adapter.

La télédétection permet d'obtenir des valeurs qui doivent être vérifiées par des données de terrain. Les possibilités de caractérisation de l'eau par télédétection dans le cadre de la grippe aviaire sont aujourd'hui limitées à ces quelques indices (turbidité, profondeur, température). Cependant, les recherches futures, concernant la survie du virus dans l'environnement, permettront peut-être d'envisager l'utilisation d'autres méthodes (existantes ou à explorer) pour caractériser l'eau (teneur en chlorophylle, sédiments etc.).

## IV. Conclusion

Dans le cadre de recherches sur la grippe aviaire et notamment sur la survie du virus dans l'environnement, la télédétection peut être un outil intéressant pour caractériser le milieu (couverture du sol). En effet, dans un premier temps, les images permettent de différencier les zones en eau des autres puis des méthodes plus ou moins complexes permettent de caractériser les paramètres de l'eau influençant la survie du virus. L'apport de données provenant de capteurs optiques et radars pourraient être croisées. Il serait alors possible de caractériser des zones inondées de manière plus ou moins pérennes, et de les classer suivant leur température, la turbidité et la profondeur. On pourrait ainsi classer des zones où le virus a potentiellement plus de chances de survivre. D'autres données peuvent venir en complément, et affiner la définition des classes pour aboutir à des classes de risque, comme la présence de populations humaines, de rizières et d'élevage (facteurs qui influenceraient la présence du virus, Gilbert et al, 2007)

Les données pourront dans un second temps être croisées avec des données épidémiologiques afin de confronter les localisations de cas de grippe aux zones potentiellement 'à risque'.

## **Chapitre 2 : Application de la télédétection à l'étude des facteurs de risque liés à l'eau de survie du virus H5N1**

### **I. Les données**

#### I.1. Les images satellites

Le choix de l'utilisation des images satellites MODIS s'est fait en fonction de l'étendue du terrain d'étude (les provinces du Cambodge), de la résolution temporelle des images (une image par jour) et également de la disponibilité et du coût des données.

Une image Landsat ETM+ a aussi été utilisée, pour justifier un seuil (voir § II.2.1) et pour faire de la photo-interprétation.

L'objectif de ce travail est de cartographier les zones en eau en 2006 et de croiser les données épidémiologiques.

##### *I.1.1. Les données MODIS*

Les données MODIS sont gratuites et téléchargeables directement depuis le site de MODIS. Des synthèses à 8 jours sont proposées, qui permettent à l'utilisateur de s'affranchir de certains prétraitements (corrections radiométriques et atmosphériques) et améliorent la qualité des données.

##### **I.1.1.1 Le capteur MODIS**

Le capteur MODIS est un capteur embarqué à bord des satellites Terra et Aqua. Les orbites de Terra et Aqua autour de la Terre sont héliosynchrones, à 705 kilomètres de la Terre. Le satellite Terra est programmé de façon à ce qu'il passe du nord au sud par l'équateur le matin, alors que Aqua passe du sud vers le nord par l'équateur l'après-midi.

MODIS Terra et Aqua permettent de visualiser l'ensemble de la surface de la Terre tous les 1 à 2 jours avec une fauchée de 2330 km, par l'acquisition de données dans 36 bandes spectrales, qui s'étendent de 0,405 à 14,385  $\mu\text{m}$ , à trois résolutions spatiales : 250m (bande 1 –rouge- et 2 -proche infrarouge-), 500m (3 –bleu- 4 –vert-, 5, 6 et 7 –MIR-) et 1000m (le reste des bandes, 8 à 36) (voir le détail dans annexe 1).

Ces données fournissent des informations sur la dynamique mondiale et les processus qui se produisent sur la Terre, dans les océans, et dans la basse atmosphère, comme : les températures de surfaces des terres et des océans, la couverture du sol, la végétation, les incendies, les surfaces enneigées et glacées et la couleur des océans ainsi que les nuages, la vapeur d'eau et les aérosols.

##### **I.1.1.2. Les synthèses à 8 jours**

Un produit de synthèse est proposé par MODIS. La taille de pixel est de 500  $\times$  500 mètres, les dimensions de l'image sont de 2400 lignes par 2400 colonnes, elle recouvre une aire de 10° par 10° (en latitude/longitude). Les pixels ont une valeur correspondant à l'estimation de la réflectance qui pourrait être mesurée en l'absence de diffusion ou d'absorption par l'atmosphère.

Plus précisément, chaque pixel contient la meilleure valeur possible observée durant une période de 8 jours c'est-à-dire avec un faible angle de visée, une absence de nuages ou d'ombres de nuages, et d'aérosols.

Le produit contient sept bandes, les bandes 1 à 7 (de rouge à moyen infrarouge, voir annexe 1), qui ont une résolution de 500m  $\times$  500m en projection sinusoidale (voir description détaillée du produit en annexe 2). Le système de référencement de l'image, *Integerized Sinusoidal (ISIN) projection*, est propre à MODIS. Il est proche du système de projection sinusoidale classique, mais est cependant centré en 0° de longitude et des coefficients spéciaux sont utilisés pour aplatir l'ellipsoïde. Cela simplifie les problèmes de traitement des données dus aux différentes résolutions (250, 500 et 1000 m) présentes sur les 36 bandes du capteur (voir grille en annexe 3).

### 1.1.2. Les données Landsat

Une image Landsat provenant du capteur ETM+ (*enhanced thematic mapper*) a été acquise gratuitement sur le site de GLCF (*global land cover facility*). Le satellite Landsat 7 sur lequel le capteur ETM+ est embarqué a été lancé en 1999, son orbite est héliosynchrone à 705 kilomètres de la Terre.

Les données sont enregistrées dans six canaux du visible, du proche et du moyen infrarouge, dans un panchromatique, dans un infrarouge thermique. La résolution spatiale est de 30m × 30m dans le visible, de 15 m × 15 m dans le panchromatique et de 60 m × 60 m dans l'Infrarouge thermique.

#### I.2. Acquisition et préparation des données

##### 1.2.1. Acquisition, reprojection, et redimensionnement

L'image Landsat a été téléchargée gratuitement à partir du site :

<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

Les images MODIS ont été téléchargées gratuitement à partir du site :

<http://edcdaac.usgs.gov/main.asp> (voir possibilité de téléchargement en annexe 4)

Ce dernier site permet d'accéder via un serveur FTP à certains produits de MODIS à certaines dates. Les images synthèses à 8 jours ont pu être téléchargées pour toute l'année 2006 (46 images), puis pour l'année 2007 (12 images).

Les images originales ont une projection sinusoidale, elles ont toutes été reprojetees dans le référentiel géodésique correspondant au Cambodge : système UTM (Universal Transverse Mercator), zone 49, datum Southasia.

Grâce à un *batch* créé sous ENVI, la reprojection a été automatisée pour nos 46 + 12 images. Un masque des contours du Cambodge a été appliqué aux images grâce à un nouveau batch sous ENVI. Toutes les images ont donc la même projection et les mêmes dimensions.

##### 1.2.2. Création d'un masque de nuage

Malgré l'utilisation de synthèses à 8 jours, de nombreux nuages sont visibles sur les images. Il a donc été nécessaire de créer un masque de nuage. L'utilisation de ce masque est essentiel de part les confusions possibles avec l'eau (les réflectances sont similaires dans certaines bandes).

Un indice est créé en utilisant les bandes verte et bleue :

$(\text{Bande bleue} - \text{Bande verte}) / (\text{Bande bleue} + \text{bande verte})$

En effet en utilisant les bandes bleue et verte, la réflectance des nuages est maximisée tandis que la réflectance des autres surfaces est minimisée. De plus, la réflectance de l'eau est plus forte dans la bande verte, et celle des nuages plus forte dans la bande bleue. L'objectif est ainsi de différencier ces deux objets.

Une image en niveau de gris est produite à partir de cet indice. En procédant par seuillage (photo-interprétation), on élimine les nuages : les pixels supérieurs à -0,13 sont classés en nuage. On applique donc pour chaque image un masque de nuage grâce à un batch sous ENVI.

(Voir procédure détaillée des prétraitements en annexe 5 et la description des *batches* en annexe 6)

### I.3. Bilan des données exploitables

Après avoir visualisé toutes les images, une liste des données exploitables est établie (utilisable : 1/ non utilisable : 0).

Le surlignage bleu correspond à la saison des pluies, le surlignage jaune à la saison sèche.

Date	N°	Utilisable	Date	N°	Utilisable
01-janv	1	1	04-juil	185	0
09-janv	9	1	12-juil	193	0
17-janv	17	1	20-juil	201	0
25-janv	25	1	28-juil	209	0
02-févr	33	1	05-août	217	0
10-févr	41	1	13-août	225	0
18-févr	49	1	29-août	241	0
26-févr	57	1	06-sept	249	1
06-mars	65	1	14-sept	257	0
14-mars	73	0	22-sept	265	0
22-mars	81	0	01-oct	273	0
30-mars	89	0	09-oct	281	0
07-avr	97	0	17-oct	289	0
15-avr	105	0	25-oct	297	1
23-avr	113	0	02-nov	305	1
01-mai	121	0	10-nov	313	1
09-mai	129	0	18-nov	321	1
17-mai	137	0	26-nov	329	1
25-mai	145	0	04-déc	337	1
02-juin	153	1	12-déc	345	1
10-juin	161	0	20-déc	353	1
18-juin	169	0	28-déc	361	1
26-juin	177	0			
21-août	233	0			

Tableau 4. — Données exploitables sur l'année 2006.

Après un rapide aperçu des données exploitables, il s'avère que peu d'images sont exploitables pendant la saison des pluies. En effet, la couverture nuageuse est très importante, et les images sont presque entièrement masquées, elles deviennent donc inutilisables.

Le choix est alors fait de ne travailler que sur la saison sèche entre la fin de l'année 2006 et le début de l'année 2007. Cette méthode permet d'avoir l'amplitude théorique de l'inondation (fin de saison des pluies- fin de saison sèche). De nouvelles images correspondant au début de l'année 2007 sont acquises et pré-traitées.

## II. Identification des zones en eau et indicateurs environnementaux

### II.1. Test des indices de l'eau

D'après la littérature, plusieurs indices existent et permettent d'identifier l'eau car certaines bandes ou combinaisons de bandes s'avèrent plus discriminantes pour l'eau (voir §. Chapitre 1.III.2.).

Le but est de créer une carte des temps d'inondation. Plusieurs indices sont testés sur deux images pré-traitées de fin de saison sèche et de fin de saison des pluies (voir annexe 7). Les indices ont été évalués qualitativement par image interprétation (voir tableau 5).

L'analyse quantitative a été écartée, car elle nécessiterait un premier seuillage des indices, et une première classification.

Indice	Ratio	Résultats
PIR	B2	Bonne discrimination de l'eau mais indice difficilement seuillable. La valeur de la réflectance varie suivant les images (les propriétés de l'eau peuvent en effet varier : par exemple la turbidité)
NDVI	$(B2-B1)/(B2+B1)$	Bonne discrimination de l'eau mais sous estimation des zones inondées à cause du mélange eau-végétation. Le NDVI est en effet un indice de végétation. Il paraît difficile de faire la différence entre végétation sèche et végétation inondée.
NDWI	$(B4-B2)/(B4+B2)$	Bonne discrimination de l'eau, résultats comparables au MNDWI, mais il s'avère moins efficace pour la saison sèche. L'eau apparaît de manière moins 'nette'.
NDWI NDII NDMI LSWI	$(B2-B5)/(B2+B5)$ $(B2-B6)/(B2+B6)$	NDWIGao : Les valeurs de l'eau dite permanente pour cet indice peuvent correspondre à d'autres types d'occupation du sol. La bande 5 est de mauvaise qualité LSWI : Il est peu discriminant, rien n'apparaît nettement.
MNDWI Ou NDPI	$(B4-B6)/(B4+B6)$ $(B6-B4)/(B6+B4)$	Très bonne discrimination. Mais confusions probables avec la végétation en eau.

Tableau 5. — Tests des indices de l'eau.

C'est l'indice MNDWI qui est choisi, il paraît le plus intéressant pour détecter l'eau sur les images.

## II.2 Choix d'un indice et d'un seuil

L'indice MNDWI (ou NDPI), qui paraît le plus adéquat, est appliqué à nos image et un seuil est recherché afin de créer des images binaires de type eau-non eau. Afin de confirmer ce seuil, une image Landsat, à plus haute résolution spatiale, est utilisée.

### II.2.1 Image Landsat

L'image Landsat date de novembre 2001 (saison des pluies) et peut être comparée à une image de même période de l'année de 2006 (les terrains inondés sont comparables d'une années à l'autre suivant les mois) . Elle ne couvre qu'une partie du Cambodge (voir annexe 8). Il est possible de faire une photo interprétation d'une partie de l'image où les zones en eau apparaissent de manière nette, néanmoins plusieurs zones sont difficilement interprétables de manière visuelle. De plus, n'ayant que peu de données de terrain, le choix est fait de procéder à une classification non-supervisée par la méthode des nuées dynamiques.

#### II.2.1.1 Classification de l'image Landsat par la méthode des nuées dynamiques

Cette méthode a l'avantage de ne nécessiter en entrée que le nombre de classes désiré en sortie et le nombre d'itérations. L'interprétation des classes est réalisée *a posteriori*.

Le principe de cette méthode consiste à placer aléatoirement des centres de classes (noyaux) dans le nuage de points (pixels) représenté dans un espace à n dimensions (n correspondant au nombre de bandes). Les pixels sont associés aux noyaux les plus proches lors de la première itération. Ensuite, les centres des classes sont recalculés et les pixels sont réaffectés aux nouveaux centres les plus proches. Après un certain nombre d'itérations fixé, lorsque la convergence est atteinte, l'algorithme de classification s'arrête.

La figure ci-après illustre un exemple de classification d'un groupe de pixels en six classes dans un espace à trois dimensions, c'est-à-dire trois bandes.

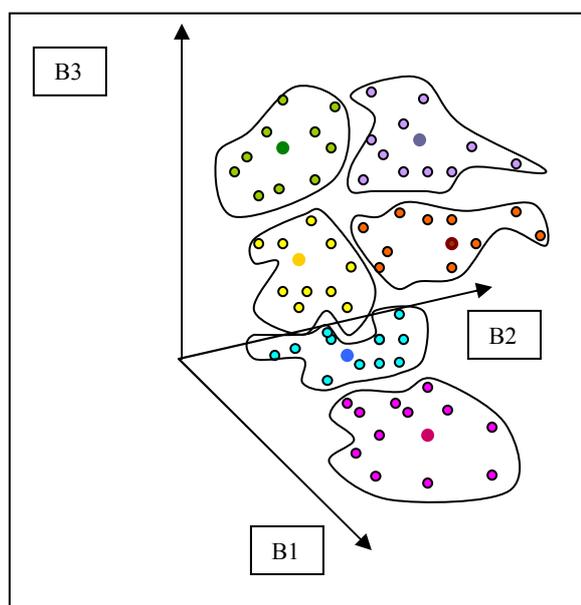
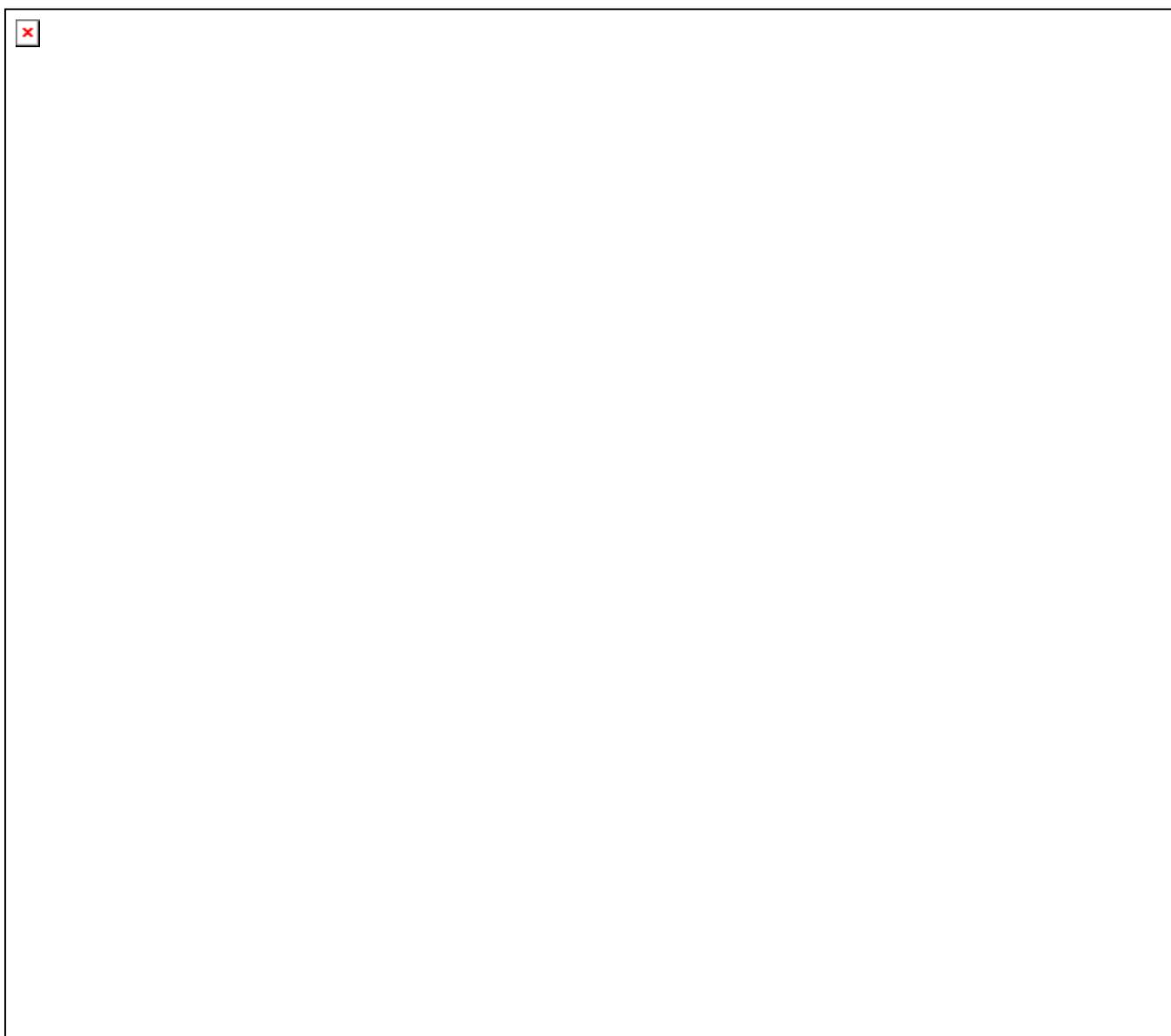


Figure 6. — Classification d'un nuage de points en six classes dans un espace à trois dimensions

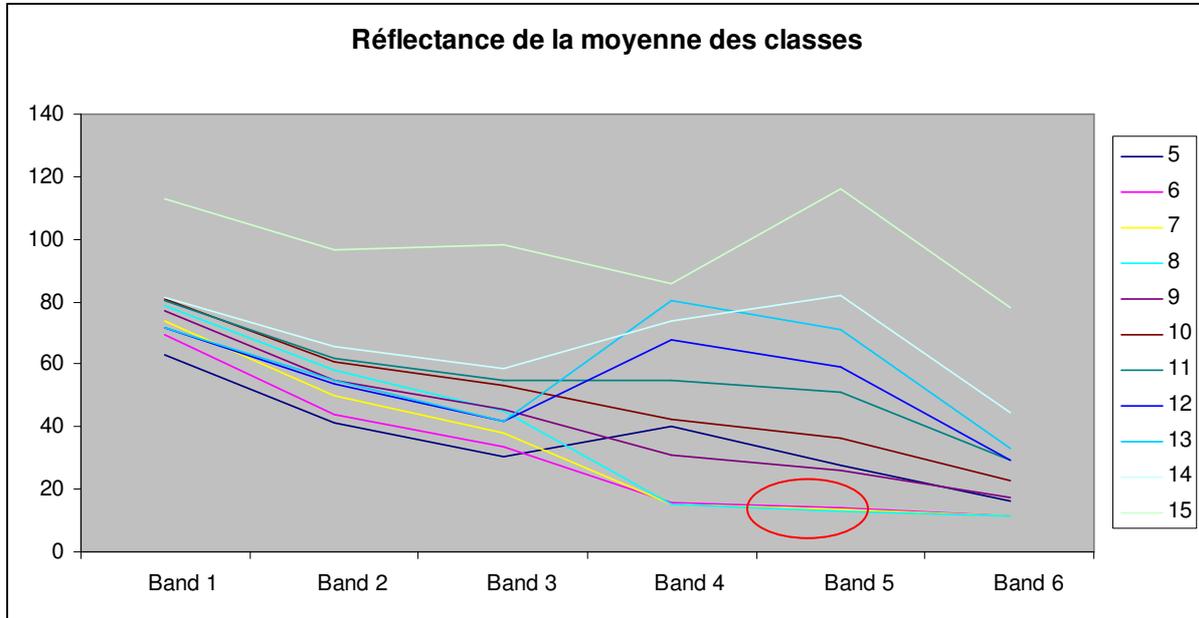
Une classification aléatoire en 15 classes est construite à partir de l'image Landsat afin de visualiser les différentes occupations du sol, et afin de détecter différents types d'eau potentiels.



**Figure 7.** — *Résultat de la classification par nuées dynamiques en 15 classes de l'image Landsat (novembre 2001).*

L'analyse des statistiques de classes permet d'interpréter cette classification. L'histogramme analysé représente la moyenne de la réflectance des classes dans les différentes bandes spectrales de l'image de départ. Le but est d'interpréter les classes en les regroupant jusqu'à obtenir une image binaire.

Trois classes apparaissent dans l'histogramme avec des valeurs faibles dans l'infrarouge. C'est une des caractéristiques de la réflectance de l'eau. Le proche infrarouge et le moyen infrarouge discriminent les 12 classes qui ne sont pas de l'eau. Ces trois classes sont regroupées en une, et toutes les autres dans une autre.



**Bande 1 : Bleu ; Bande 2 : Vert ; Bande 3 : Rouge ; Bande 4 : Proche infrarouge ; Bande 5 : Moyen infrarouge ; Bande 6 : Moyen infrarouge**

**Figure 8.** — Réflectance de la moyenne des classes issues de la classification de l'image Landsat par la méthode des nuées dynamiques.

### II.2.1.2 Choix du seuil

Une image binaire est construite, puis ré échantillonnée à 500 mètres (les pixels sont agrégés selon la méthode de la valeur maximum pour avoir des pixels de 500m × 500m), afin de pouvoir la comparer à une classification binaire à partir d'une image MODIS seuillée grâce au MNDWI de la même période de l'année.

L'image MODIS est découpée de manière à ce que les deux images puissent se superposer. Les superficies en eau sont alors calculées sur les deux images et superposées pour identifier le seuil le plus adéquat. Les tests portent sur différentes valeurs de seuil (-0.35, -0.36,-0.37,-0.40), qui visuellement correspondraient le plus à des zones en eau. On considère que tous les pixels ayant une valeur au-dessus du seuil sont en eau, et les autres ne le sont pas.

	Pixels 'non eau' Landsat (%)	Pixels 'eau' Landsat (%)	Pixels bien classés (%)
Pixels 'non eau', seuil -0,35 (MODIS) (%)	85,65	1,95	94,75
Pixels 'eau', seuil -0,35 (MODIS)	3,30	9,10	
Pixels 'non eau', seuil -0,36 (MODIS)	88,07	4,16	94,96
Pixels 'eau', seuil -0,36 (MODIS)	0,88	6,89	
Pixels 'non eau', seuil -0,37 (MODIS)	84,63	1,73	93,94
Pixels 'eau', seuil -0,37 (MODIS)	4,32	9,32	
Pixels 'non eau', seuil -0,40 (MODIS)	82,37	1,46	91,96
Pixels 'eau', seuil -0,40 (MODIS)	6,57	9,59	

**Tableau 6.** — Croisement du nombre de pixels en eau ou non à partir de la classification non supervisée de l'image Landsat et des images binaires MODIS obtenue par seuillage.

Ce tableau à double entrée représente le pourcentage de pixels qui sont en eau (ou non) sur l'image Landsat et en eau (ou non) sur l'image binaire MODIS. Le plus grand nombre de pixels bien classés concerne le seuil -0,36. Il semble donc ici le plus approprié pour extraire les zones en eau sur les images MODIS. Cette méthode est complétée par l'apport de données de terrain.

### II.2.2 Données de terrain

Une visite de terrain dans les provinces les plus touchées par le virus H5N1 a eu lieu au mois d'octobre 2007. À cette occasion, différents types d'occupation du sol ont été localisés par GPS, dont dix zones en eau, localisées dans le périmètre limité des provinces visitées.

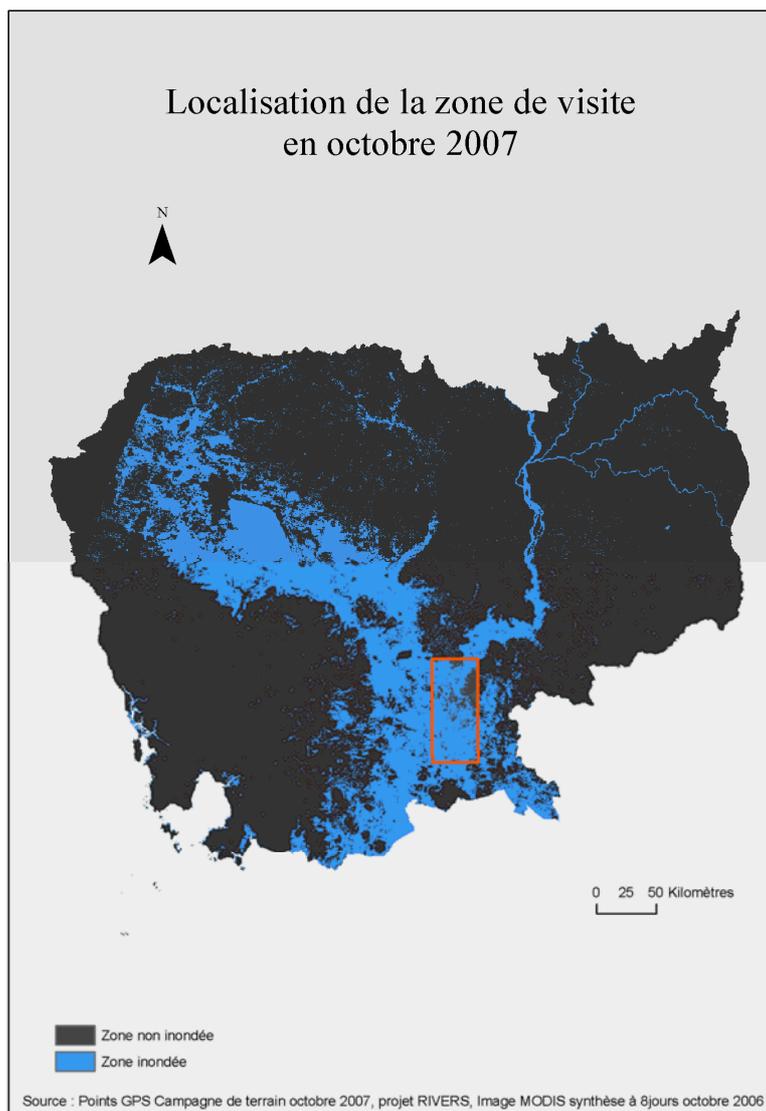
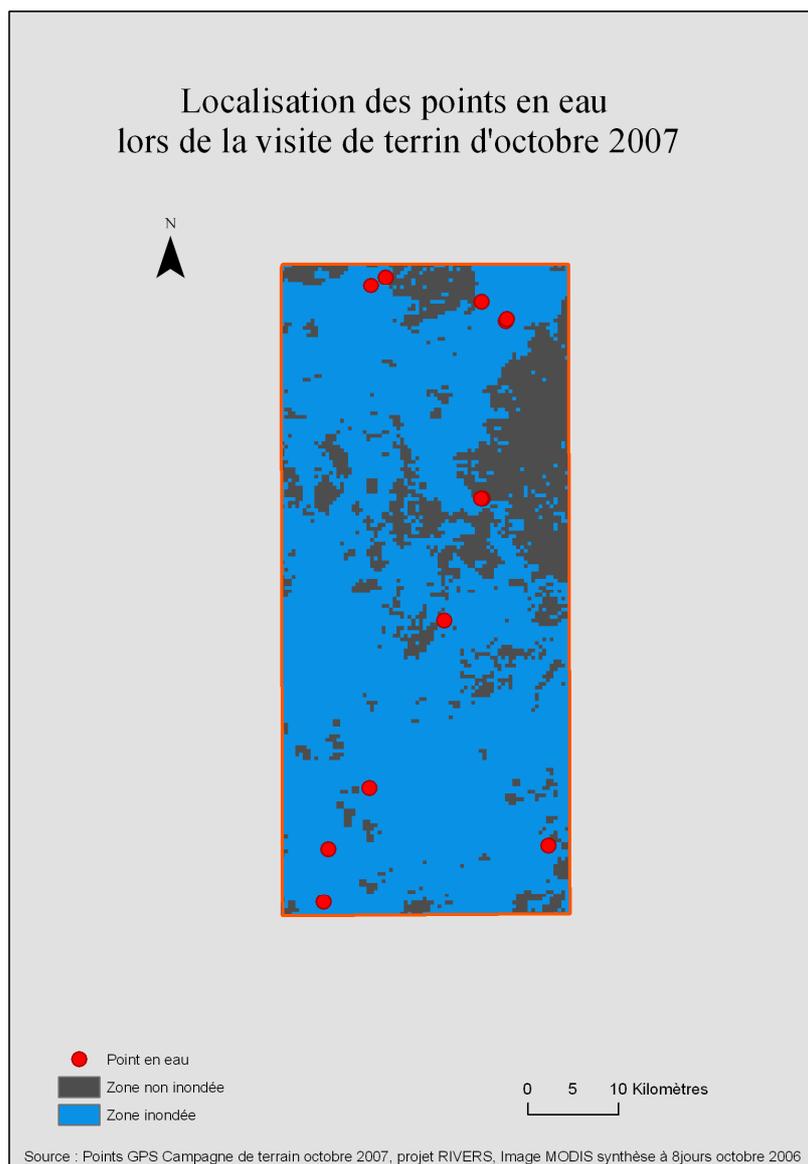


Figure 9. — Localisation de la zone d'étude lors de la visite de terrain en octobre 2007.



**Figure 10.** — Localisation des données de 10 zones en eau lors de la visite de terrain en octobre 2007.

Tous les points de terrain en eau correspondent à des zones en eau sur l'image classifiée. Cette observation tend à confirmer l'utilisation du seuil -0.36 pour l'indice MNDWI.

### II.3. Cartographie des zones inondées par addition

Un batch écrit sous ENVI permet d'obtenir une série d'images binaires créées grâce au seuil (-0.36) d'images en niveaux de gris de l'indice MNDWI (voir annexe 6). Une carte des temps d'inondation est construite (voir figure 13) grâce à une méthode simple consistant à additionner les images binaires. Ainsi, plus la valeur du pixel est grande, plus le temps d'inondation est long (voir figure ci-après).

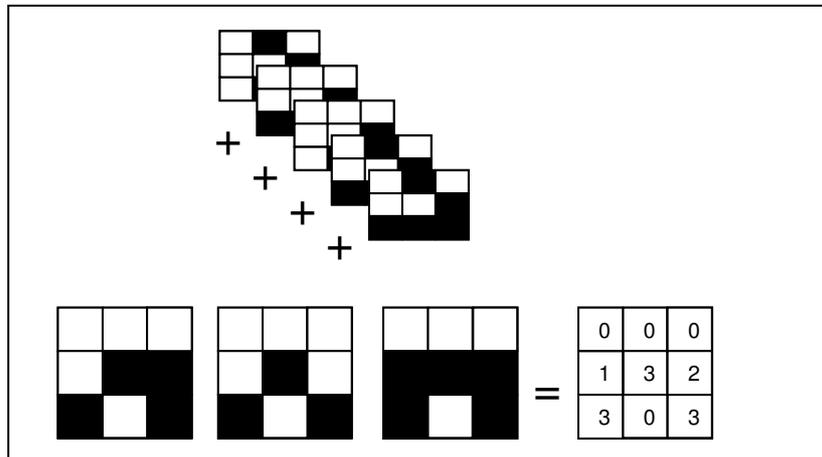


Figure 11. — Addition.

### II.4 Test de la méthode des séries temporelles

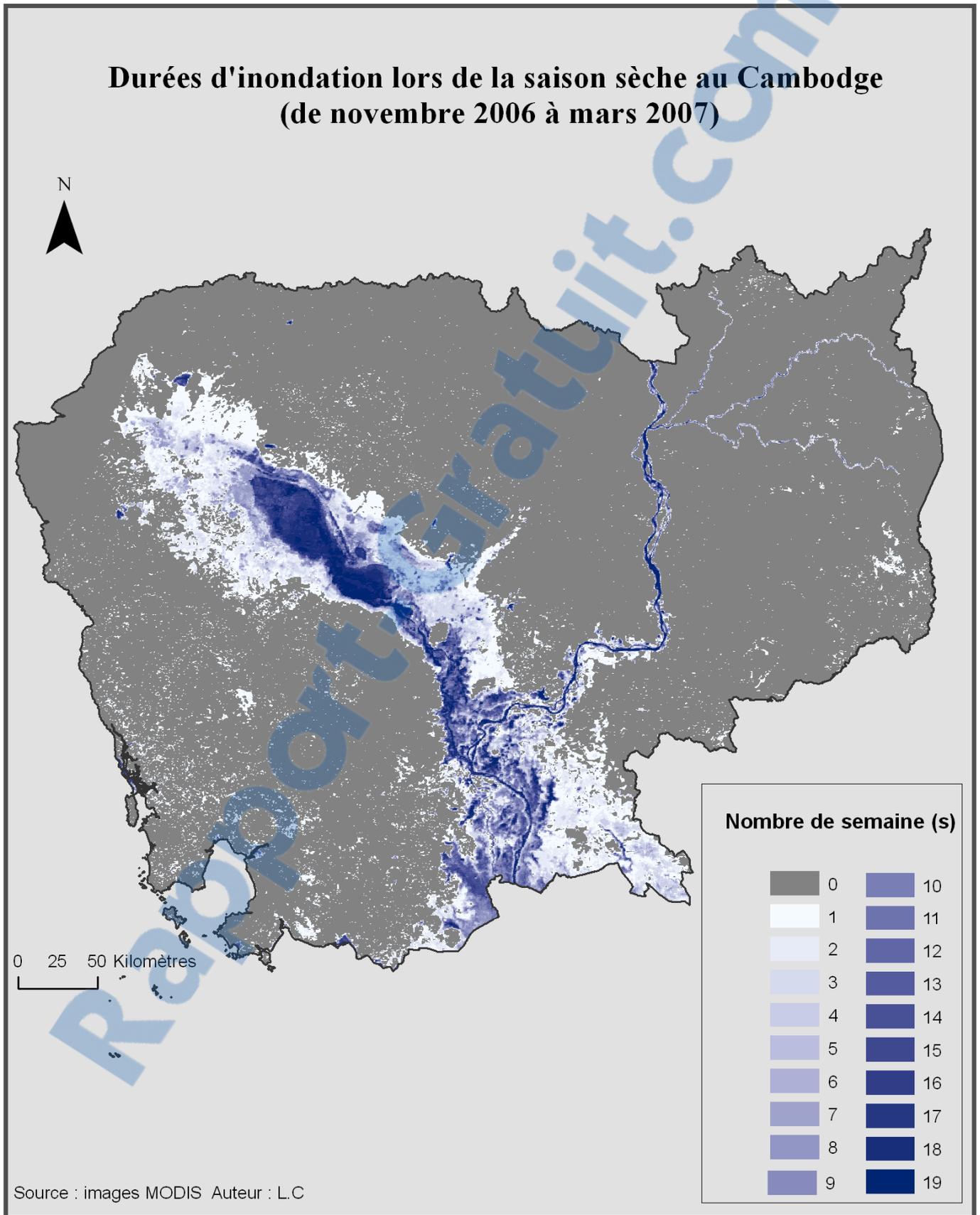
Cette méthode est exploratoire, l'objectif est de dégager de nouvelles informations quant à l'occupation du sol et plus particulièrement aux surfaces en eau. On cherche en effet à caractériser le type de zone en eau.

À partir d'une série d'images en niveau de gris de l'indice MNDWI, une nouvelle image comprenant 6 bandes est construite. Chaque bande correspond à une date donnée (environ une image par mois durant la saison sèche, pour lesquelles les niveaux de gris correspondent à l'indice MNDWI). Le choix des images s'est fait relativement à leur qualité (le moins de nuages possible, pour éviter d'avoir de trop grandes zones à zéro)

N°	Date de la synthèse
297	25 Octobre
329	26 Novembre
1	1 Janvier
25	25 Janvier
49	18 Février
73	14 Mars

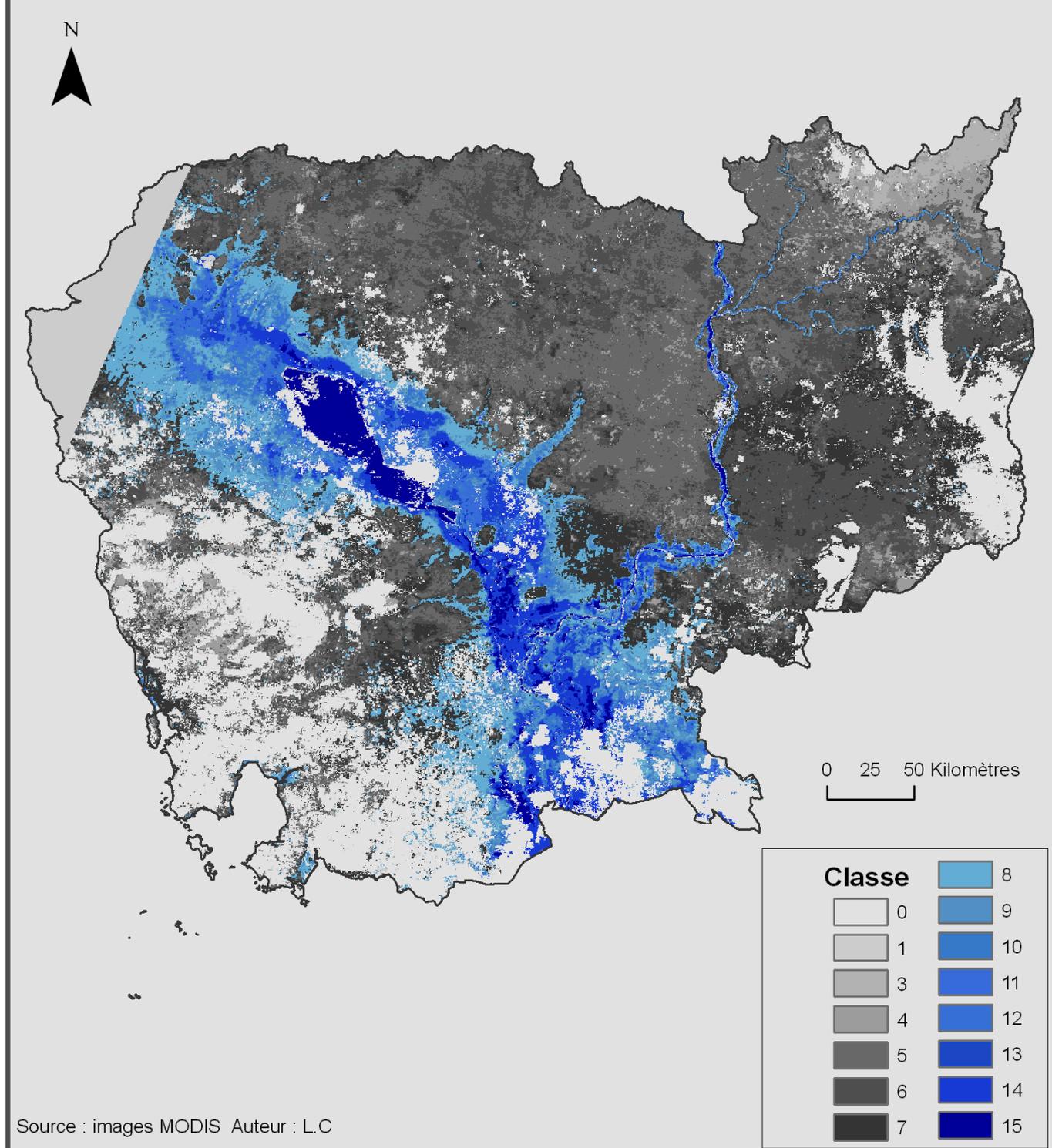
Tableau 7. — Images utilisées pour le test de la méthode des séries temporelles.

Une classification non supervisée de cette nouvelle image est alors réalisée par la méthode des nuées dynamiques (voir § II.2.1.1). Les pixels sont regroupés selon leur comportement temporel dans les six bandes. En effet selon la valeur de chaque pixel (c'est-à-dire la valeur de l'indice MNDWI) dans chaque bande (à chaque date), un regroupement est opéré pour obtenir une classification en 15 classes.



**Figure 12.** — Temps d'inondation au Cambodge durant la saison sèche 2006-2007 établis à partir de l'addition des images binaires provenant du seuillage de l'indice MNDWI.

### Résultats de la classification non supervisée chronologique de l'indice MNDWI pendant la saison sèche au Cambodge (novembre 2006 à mars 2007)



**Figure 13.** — Classification non supervisée chronologique réalisée à partir d'une image comprenant 6 bandes provenant de 6 images en niveau de gris de l'indice MNDWI au cours de la saison sèche 2006-2007.

## II.5. Analyse des résultats et validation

### II.5.1 Analyse des résultats

Pour les deux résultats, il apparaît que seuls les cours d'eau les plus larges sont détectés en raison de la résolution des données de départ (500 m).

#### II.5.1.1. La méthode additive

Cette méthode, basée sur un seuillage d'indice permet d'obtenir une carte des temps d'inondation. La cartographie finale est précise, car chaque pixel contient une valeur de temps d'inondation. Cette carte montre l'étendue maximale de l'inondation au Cambodge avec une extension importante du lac, et un large débordement des cours d'eau. Ainsi, d'après cette carte, l'inondation peut atteindre une superficie de 32 000 km<sup>2</sup> (plus de 17% de la surface du Cambodge).

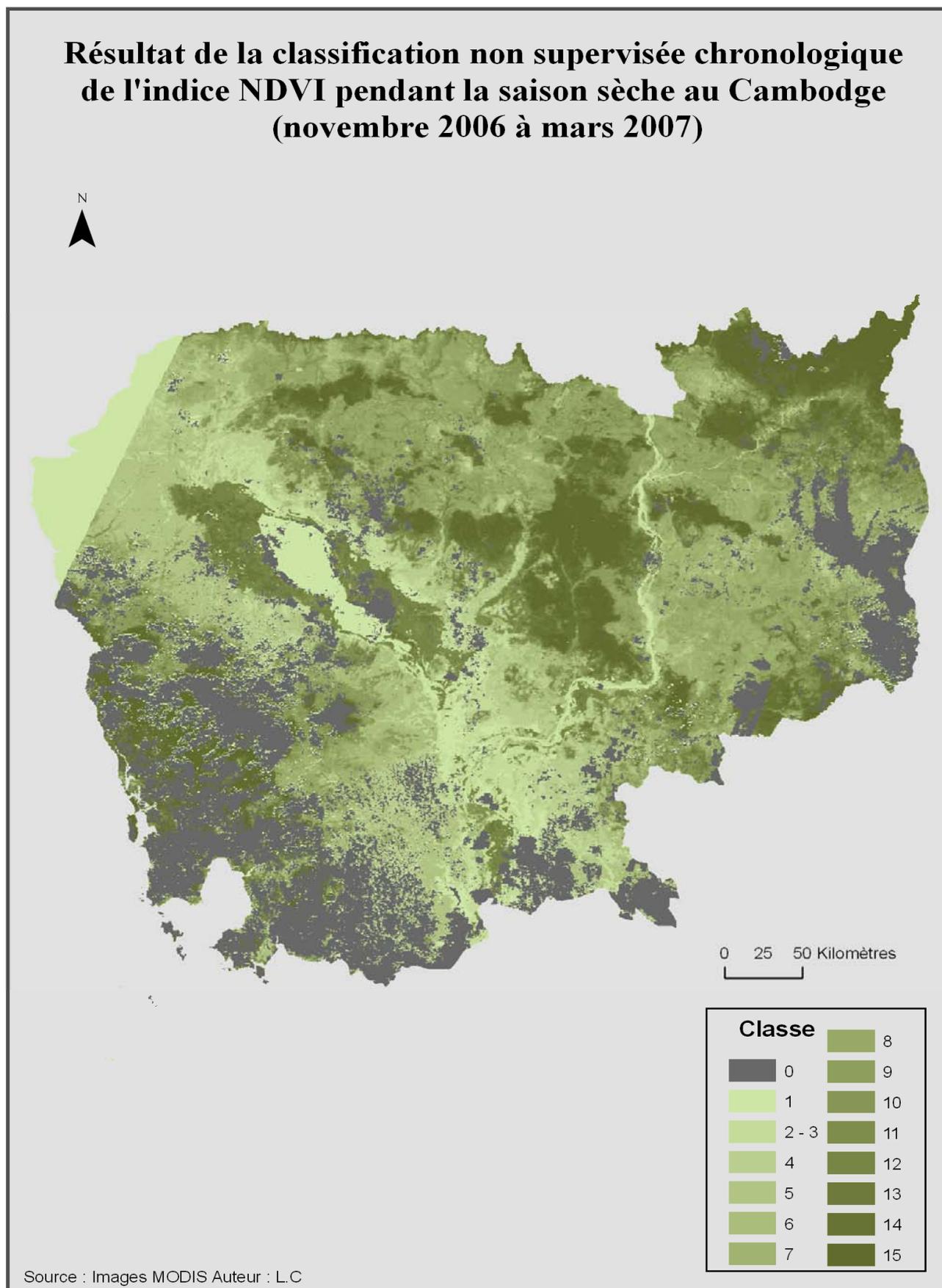
Les limites de cette méthode tiennent à la présence de nuages sur les images. En effet, les cours d'eau principaux ne peuvent être identifiés comme permanents (c'est-à-dire correspondant à un temps d'inondation maximum), car certaines parties ne sont visibles que pendant quelques semaines. Les temps d'inondations cartographiés sont donc à relativiser, au vu de la présence de nuages. Néanmoins la carte permet de donner des précisions sur les zones inondables relativement les unes par rapport aux autres.

#### II.5.1.2. Méthode des séries temporelles d'indices

D'après la littérature scientifique, l'indice MNDWI permet de discriminer l'eau et également la végétation en eau (cf. tableau 2 page 14). La classification en 15 classes par les nuées dynamiques de l'image comprenant six canaux –six images en niveau de gris de l'indice MNDWI- permet d'obtenir des classes selon la signature temporelle de chaque pixel.

Ces classes peuvent ainsi être interprétées comme des classes temporelles d'inondation voire d'humidité. Par exemple, on pourra avoir une classe dont la valeur moyenne de l'indice est constante au cours du temps, ou en diminution : on peut alors interpréter cette classe comme une inondation ou une humidité constante au cours du temps, ou alors une humidité en diminution etc.

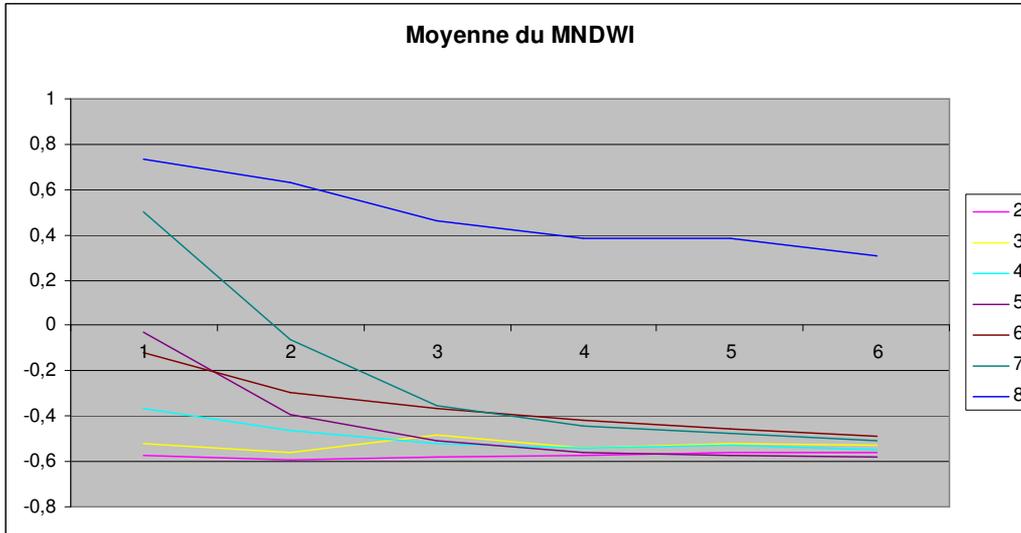
D'après les résultats obtenus, il semble intéressant de tester la même méthode avec l'indice de végétation NDVI, qui pourra apporter de nouvelles informations sur l'occupation du sol, et plus particulièrement sur la production végétale au cours de la même saison. Il s'agit ici d'apporter des précisions sur le type d'inondation (voir figure suivante).



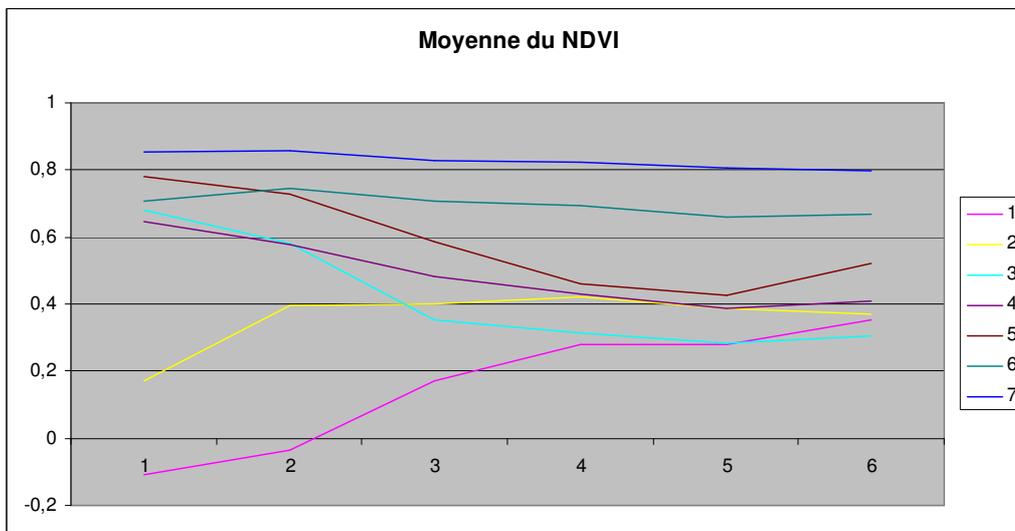
**Figure 14.** — Classification non supervisée chronologique réalisée à partir d'une image comprenant 6 bandes provenant de 6 images en niveau de gris de l'indice NDVI au cours de la saison sèche 2006-2007.

Les signatures temporelles de chaque classe peuvent être analysées grâce aux histogrammes qui représentent la variation moyenne pour chaque classe de la valeur des indices MNDWI et NDVI au cours du temps (l'axe des abscisses représente chaque bande, donc chaque date).

Après examen des histogrammes (voir annexe 9), les classes sont regroupées en sept nouvelles classes pour chaque classification (voir histogrammes suivant). L'objectif est de diminuer leur nombre afin d'éviter les redondances (certaines classes ont des signatures temporelles semblables).



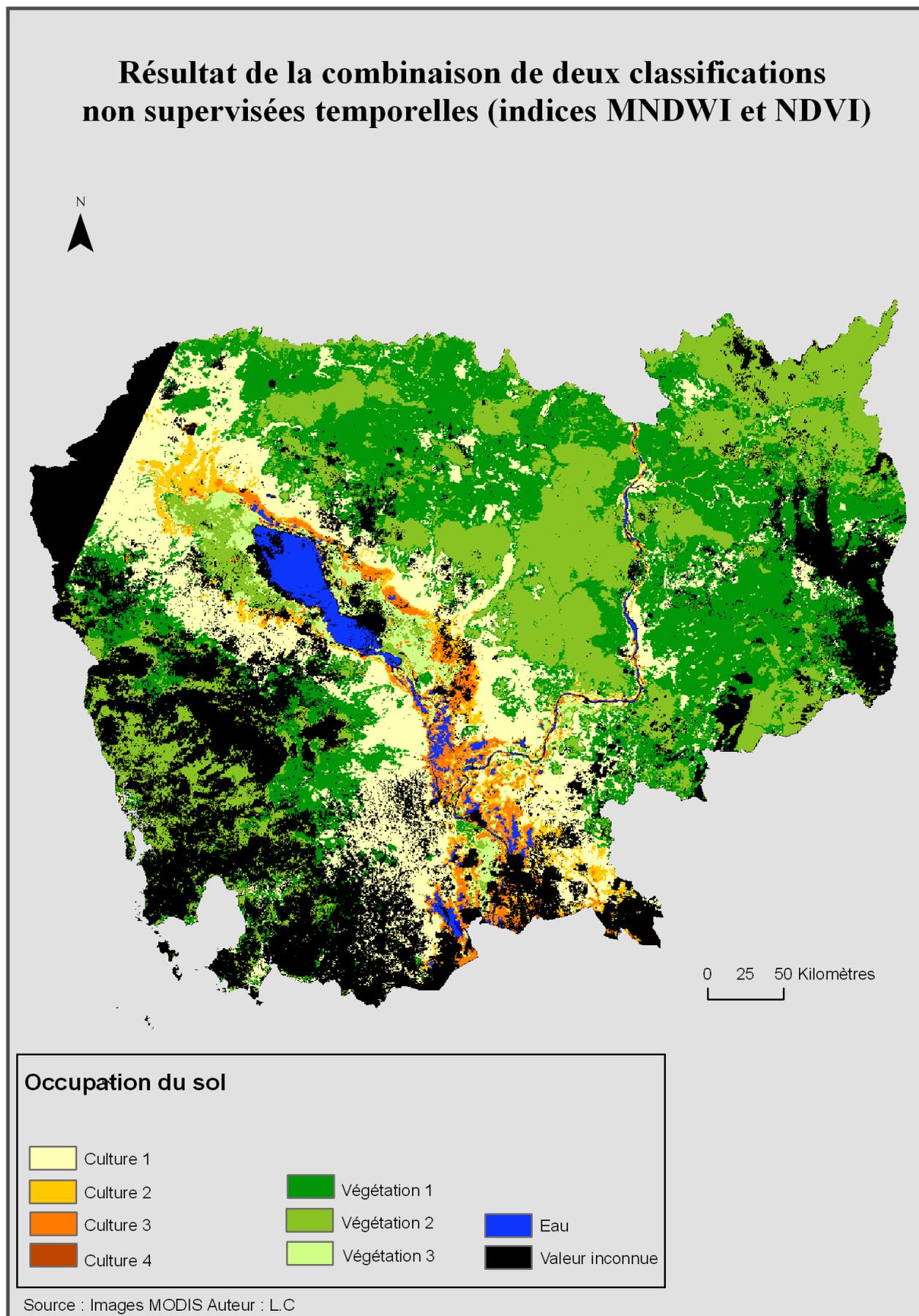
**Figure 15.** — Classes obtenues à partir d'une classification non supervisée chronologique (images en niveau de gris de l'indice MNDWI sur la saison sèche 2006/2007).



**Figure 16.** — Classes obtenues à partir d'une classification non supervisée chronologique (images en niveau de gris de l'indice NDVI sur la saison sèche 2006/2007).

Puis, les deux classifications sont croisées, afin d'obtenir une troisième classification, prenant en compte des informations relatives à l'eau et à la végétation, ainsi qu'à la variation de ces deux paramètres dans le temps (voir résultats figure 18). La méthode mise en œuvre pour croiser les deux classifications est la suivante :

Les classes de MNDWI sont multipliées par 10 puis additionnées aux classes de NDVI. Les pixels de la nouvelle classification contiennent une valeur à deux chiffres, le premier représentant la classe de MNDWI, et le second la classe de NDVI.



**Figure 17.** — Classification obtenue à partir de l'addition de deux classifications non supervisées chronologiques d'images en niveau de gris des indices MNDWI et NDVI au cours de la saison sèche 2006-2007 au Cambodge.

Grâce à l'analyse de ces deux chiffres, les classes ont été interprétées pour construire la légende.

Culture 1 (21,22,23,24,31,32,33,34,41,42,43,44)	Humidité faible, NDVI en augmentation
Culture 2 (51,52,53,54,61,62,63,64)	Humidité moyen-fort qui diminue, NDVI moyen
Culture 3 (71,72)	Humidité forte en diminution, NDVI en augmentation
Culture 4 (74,73)	Humidité forte en diminution, NDVI fort en diminution
Végétation 1 (25,35,45,)	Humidité faible, NDVI assez fort en diminution
Végétation 2 (26,27,36,37,46,47)	Humidité faible, NDVI fort
Végétation 3 (65,75,85,56,57,66,67,76)	Humidité moyenne à forte, NDVI fort

**Tableau 8.** — *Interprétation des classes de la classification combinée, par l'observation des valeurs des indices MNDWI et NDVI*

Cette seconde méthode permet d'apporter un nouvel éclairage sur la carte des temps d'inondation, en précisant le type d'occupation du sol.

Ainsi, en croisant les temps d'inondation à l'occupation du sol, on peut voir que les surfaces inondées le moins longtemps correspondent à des zones de cultures (notamment les cultures 2 et 3, qu'on ne retrouve pas en zone non inondée), puis des zones de végétation (voir annexe 10).

### II.5.2. Validation des résultats par l'utilisation de données annexes

Une carte de l'hydrographie du Cambodge confirme que les données utilisées ne permettent d'identifier qu'une partie des cours d'eau irrigant le territoire (le Mékong, le Tonlee Kong, le Tonlee Saan, et le Tonle Sraepok), du fait de la résolution spatiale (voir annexe 11).

#### II.5.2.1. La carte numérique du monde (*Digital chart of the world*)

La carte numérique du monde (*digital chart of the world*, DCM) est un produit de l'institut de recherche des systèmes environnementaux. Les sources proviennent à l'origine de l'agence de cartographie pour la défense des Etats-Unis (US Defense Mapping Agency) et de la cartographie de navigation jet (*Jet navigation charts*). Elles sont complétées par des sources internationales, bases de données, photographies aériennes et imagerie spatiale (AVHRR<sup>1</sup>).

Des données vectorielles concernant les surfaces en eau ont été téléchargées gratuitement à partir du site :

<http://biogeo.berkeley.edu/bgm/gdata.php>

Ainsi, les superficies des polygones correspondants à l'eau pérenne, à l'eau non pérenne, et aux autres surfaces sont croisées aux superficies des classes de temps d'inondations (voir carte des polygones en annexe 12).

L'eau pérenne est bien repérée mais pas dans les détails, puisque seul 22% de la surface du polygone de l'eau pérenne correspond à la classe 19, mais plus de 80% de la surface correspond aux classes 10 à 19.

L'eau non permanente est repérée à près de 80%, mais les temps d'inondation doivent donc être relativisés au vu de ce qui a été constaté précédemment. La surface du polygone de tous les autres types de surface correspond à 88% à la classe 0, et à 7% à la classe 1. La classe 1 correspond en effet à 77% à ce qui n'est pas eau. Ce chiffre peut correspondre à une confusion avec les nuages. En effet, malgré l'utilisation d'un masque, des nuages pourraient persister sur les images et cela expliquerait les chiffres obtenus.

#### II.5.2.1. Occupation du sol GLC

L'institut pour l'environnement et le développement durable, appartenant au centre de recherche commun européen, met en ligne une classification de l'occupation du sol en 2000 à 1 kilomètre de résolution (voir annexe 13). Ce projet a été réalisé en collaboration avec plus de trente équipes de recherche à travers le monde. Ainsi, ces données de référence ont été fournies aux

<sup>1</sup> advanced very high resolution radiometer

Conventions Internationales sur le Changement climatique, la Convention sur la Lutte contre la Désertification, la Convention Ramsar et le Protocole de Kyoto.

Les données raster ont été téléchargées gratuitement à partir du site :

<http://www-gem.jrc.it/glc2000/>

Ces données sont confrontées quantitativement à la classification issue des séries temporelles d'indices NDVI et MNDWI (voir annexe 14). Les résultats sont à analyser en tenant compte de la différence de résolution spatiale. En effet, le travail a été effectué sur des données de 500 m × 500m, alors que celles-ci sont de 1km × 1km.

Les classes sont ainsi interprétées :

Culture 1	Culture non irriguée
Culture 2	Culture inondées ou irriguées
Culture 3	Culture inondées ou irriguées (rizières)
Culture 4	Culture ou végétation périodiquement en eau
Végétation 1	Formation végétale ouverte
Végétation 2	Forêt
Végétation 3	Forêt inondée

**Tableau 9.** — *Interprétation des classes de la classification combinée par l'apport de nouvelles données*

Au lieu d'être d'un type unique, ces classes pourraient être constituées d'une mosaïque de types d'occupation du sol. En effet, les classes reflètent un comportement moyen relatif à l'humidité et à la production végétale. Elles permettent néanmoins de mieux comprendre l'occupation du sol au Cambodge, et de pointer les zones en eau potentiellement minimisées lors de l'établissement de la carte des temps d'inondation (notamment les zones de rizières et de forêts inondées). Ces zones inondées pourraient, à certaines périodes de l'année, ne pas être considérées en eau par le seuillage de l'indice MNDWI (-0,36).

Ainsi, deux méthodes ont été testées :

- La méthode par seuillage d'indice permet d'identifier date par date les zones en eau. Les images binaires sont alors additionnées pour avoir une image finale théorique des temps d'inondation. On obtient une carte précise puisqu'on ne procède à aucun regroupement.
- La deuxième méthode est plus automatique et ne nécessite pas d'interprétation préalable. De plus, ce type de classification a l'avantage de prendre en compte la variation temporelle de l'indice. Le croisement de deux types d'indice (le premier plus sensible à l'eau et à l'humidité et le deuxième plus sensible à la végétation) apporte de nombreuses informations sur l'occupation du sol, et notamment dans les zones inondées.

Dans les deux cas, les limites des résultats tiennent à la présence de nuages et à la possibilité de les masquer. Il faut trouver un masque efficace des nuages, mais également une méthode d'interpolation afin de récupérer les données manquantes. La précision serait ainsi plus grande, et moins de zones seraient masquées.

Les deux cartographies sont complémentaires, et semblent intéressantes pour croiser les données épidémiologiques.

### III. Croisement de données

#### III.1. Les données épidémiologiques

Parallèlement à ce stage s'est réalisé le stage d'Anne Conan à l'institut Pasteur au Cambodge. Ce stage avait pour objectif la « définition clinique d'un cas d'influenza aviaire hautement pathogène (H5N1) en élevage villageois au Cambodge ».

Le travail a été réalisé à partir d'une base de données appartenant au NaVRI (National Veterinary Research Institut).

Les informations contenues dans la base de données concernent :

- « l'identification de l'éleveur et les caractéristiques de l'élevage le jour de l'enquête (localisation, élevages de poulets ou de canards, ...) : 15 variables »
- « l'achat de volailles (lieu, date, ...) : 9 variables »
- « les mouvements de volailles (lieux dans ou hors du village, mélange avec d'autres animaux, ...) : 17 variables »
- « les caractéristiques cliniques chez le poulet et le canard observées lors de l'épizootie (symptômes, morts, caractéristiques de mortalité, ...) : 21 variables pour chaque espèce »

Ainsi, ce travail a permis de construire deux définitions de cas :

- « Un élevage de canard est potentiellement infecté s'il y est observé soit des torticolis (symptôme de la grippe) soit uniquement des animaux jeunes touchés avec un taux de mortalité supérieur à 89% soit des adultes affectés avec un taux de mortalité supérieur à 18%. »
- « Un élevage de poulets est quant à lui potentiellement infecté si tous les âges de poulets sont infectés ou si le taux de mortalité est supérieur à 20%. »

Ces définitions sont utilisées comme « diagnostic précoce dans le système de surveillance de l'influenza aviaire dans les villages cambodgiens ». Elles ont été appliquées à une base de données de mortalité de 2006 de six provinces surveillées (voir figure 18 et 19) afin de définir les élevages touchés par le virus. Les informations contenues dans la base de données proviennent des déclarations des éleveurs.

Finalement, le travail a pu être réalisé à partir d'une base de données nettoyée, dans laquelle sont répertoriés tous les villages infectés. Un village est considéré comme infecté si 40% de ses élevages correspondent aux définitions ci-dessus. On compte ainsi 4276 villages en tout, dont 426 infectés, répartis dans six provinces.

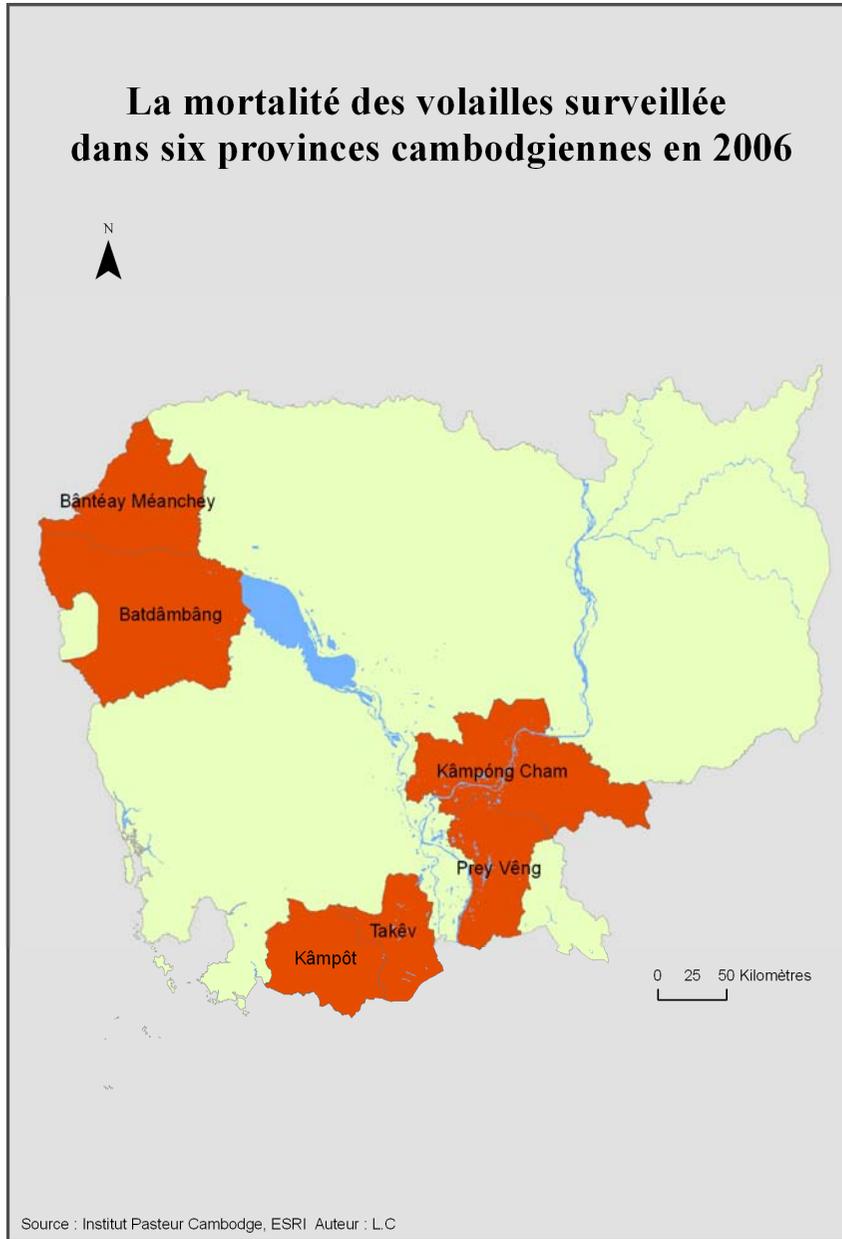


Figure 18. — Les provinces surveillées en 2006

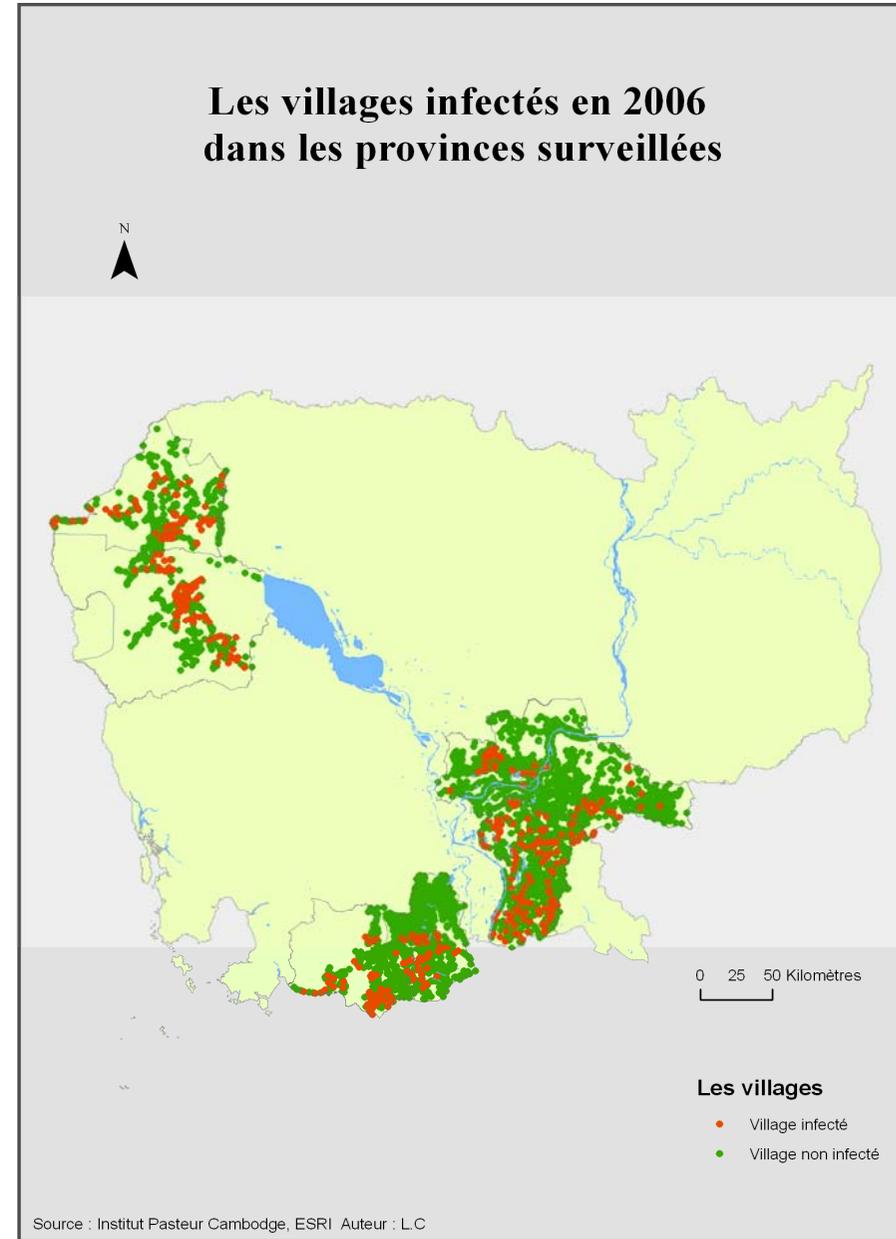


Figure 19. — Les villages infectés en 2006

### III.2 Utilisation d'un SIG pour croiser les données

Le logiciel Arcgis a été utilisé pour croiser les données épidémiologiques et les données environnementales provenant de nos résultats.

Auparavant un test d'autocorrélation spatiale est réalisé sur les données épidémiologiques, le test de Moran. Ce test montre une forte autocorrélation positive, ce qui signifie que les villages sont regroupés dans l'espace, la distribution n'est pas aléatoire et ils peuvent donc présenter de fortes similarités. Cette caractéristique peut induire une faible différenciation entre les types de villages (infectés, non infectés).

On écarte donc la méthode des zones tampons (trop de superpositions), et on décide de créer une grille hexagonale dont chaque unité présente un diamètre de 10 kilomètre (outil téléchargé sur internet Jensen Enterprise : [http://www.jennessent.com/arcgis/repeat\\_shapes.htm](http://www.jennessent.com/arcgis/repeat_shapes.htm)).

Chaque hexagone a le statut infecté s'il contient au moins un village infecté, sinon, il est sain.

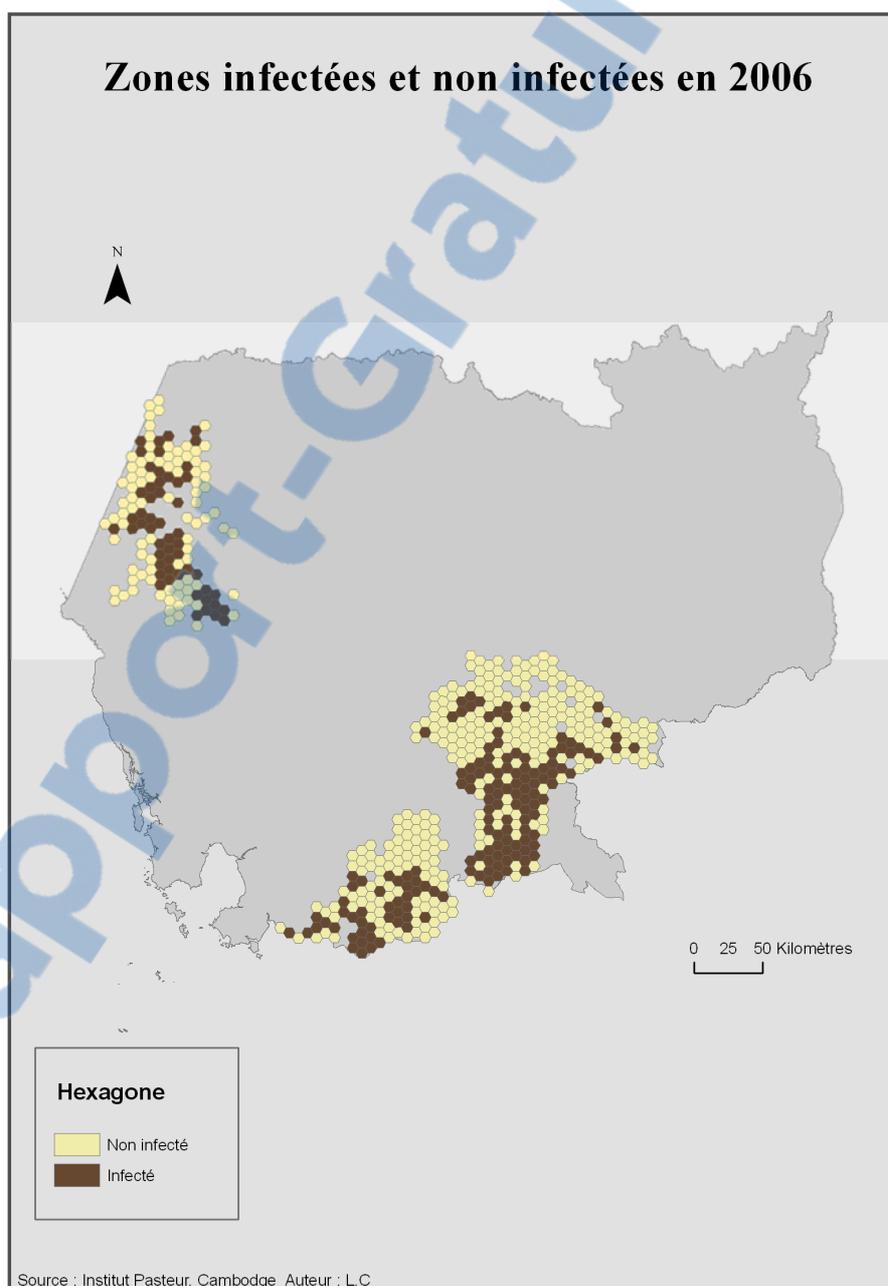
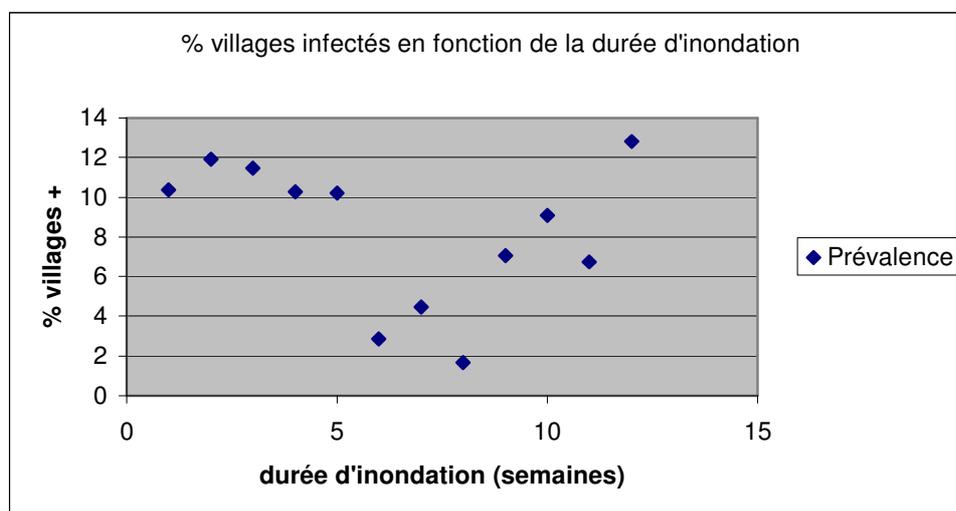


Figure 20. — Hexagones infectés et non infectés

Les données épidémiologiques sont donc croisées aux temps d'inondation. On ne relève pas de différences significatives de moyennes de durée d'inondation entre le groupe des hexagones infectés et le groupe des hexagones non infectés.

On trouve cependant plus d'hexagones, et de villages infectés (prévalence plus forte) pour les durées d'inondation courtes (<5 semaines) où très longues (>10 semaines).



**Tableau 10.** — Pourcentage de villages infectés en fonction de la durée d'inondation

### III.3 Analyse des résultats et discussion

Ainsi, les zones infectées sont plutôt caractérisées par des temps d'inondation de 1 à 5 semaines, correspondent au début de la saison sèche, et des temps d'inondation permanente.

Les villages où ont été identifiés les cas de H5N1 se situeraient donc plutôt dans des zones de culture 1 et 2 et près des cours d'eau (et lacs) permanents. D'après l'apport des données annexes, et l'analyse du NDVI, les zones de culture 1 et 2 pourraient correspondre en partie à des zones de rizières. Cette observation tendrait à confirmer la littérature scientifique, et notamment les études de Gilbert et al (2006 à 2008).

Les zones inondées pourraient conserver des zones en eau plus ou moins grandes (de type mares, ou étendues peu profondes) après le retrait de l'inondation et ne seraient alors pas détectables par les capteurs utilisés (résolution de 500m). Il conviendrait donc de focaliser sur les zones potentiellement à risque par l'apport de nouvelles données plus précises et de procéder à une nouvelle analyse grâce au croisement avec les données épidémiologiques.

Les perspectives à envisager, afin d'approfondir l'analyse, sont d'une part l'interpolation de données manquantes (nuages) et l'acquisition de nouvelles données à une résolution plus fine pour préciser l'occupation du sol (rizières, zones en eau). D'autre part, il pourrait être intéressant d'envisager l'utilisation de données radar qui pourraient être une solution pour la détection de l'eau pendant la saison des pluies. En effet cette méthode présente l'avantage de pouvoir travailler dans des zones nuageuses (le signal n'est pas brouillé par les nuages).

## Conclusion

### Le stage

La grippe aviaire, qui a touché une grande partie du monde a causé de nombreuses pertes tant sur le plan économique que social et représente aujourd'hui une réelle menace pour la santé humaine.

Plusieurs études dans la littérature scientifique ont montré l'intérêt de l'utilisation de l'information géographique dans la compréhension et la gestion des vagues d'épidémies, notamment en Asie. Plus particulièrement, les études ayant utilisé la télédétection ont porté jusqu'ici sur l'extraction d'indicateurs environnementaux relatifs à l'occupation du sol (rizières et zones inondées) et à la température de surface (gelées et vagues de chaleur) pour mieux comprendre les dynamiques temporelles et les schémas spatiaux des vagues d'épidémies.

La présente étude quant à elle, s'est attachée à identifier l'eau comme milieu de survie potentiel du virus H5N1. La synthèse bibliographique a permis dans un premier temps de comprendre quels étaient les facteurs qui conditionnaient la survie du virus dans l'eau. Et dans un deuxième temps, on a dressé le bilan des méthodes de télédétection les plus courantes utilisées pour extraire les zones en eau dans une image et également pour évaluer les caractéristiques de l'eau (paramètres pouvant influencer la survie du virus).

Ainsi, la température, la turbidité et la profondeur sont les principaux paramètres qui peuvent être identifiés par télédétection, et qui apporteraient des informations intéressantes dans le cadre d'une étude sur les milieux de survie potentiels du virus. De futures études en télédétection et en épidémiologie permettront d'apporter de nouvelles données.

On a dans un premier temps décidé de s'attacher à la détection des surfaces en eau, qui peuvent représenter un des indicateurs de risque sanitaire. Ce facteur devrait en effet s'insérer dans un système plus complexe d'analyse du risque, en complément d'autres variables (humaines et environnementales).

À partir de données à moyenne résolution MODIS, une carte des temps d'inondation a été créée par une méthode d'addition d'images binaires provenant du seuillage d'un indice de l'eau (le MNDWI). Puis, deux classifications non supervisées temporelles ont été créées à partir de deux indices, le MNDWI, et le NDVI. La combinaison de ces deux classifications a permis d'obtenir de nouvelles informations sur l'occupation du sol et vient en complément de la première carte.

Après avoir croisé les données épidémiologiques (villages infectés), les résultats montrent que les zones inondées en périphéries de la zone inondable, qui seraient en partie des zones de rizières, où les temps d'inondation sont de 1 à 5 semaines, et les zones proches des eaux permanentes, sont les zones les plus touchées.

Par la suite, il pourrait être intéressant de discriminer des classes d'eau suivant la température et la turbidité, grâce à des données MODIS comme cela a déjà été réalisé dans de précédentes études.

L'acquisition de nouvelles données, à une échelle plus fine sur les zones précédemment identifiées, permettraient de détecter de nouvelles zones en eau et préciseraient les caractéristiques de l'eau.

### Bilan personnel

Ce stage fut très enrichissant, d'un point de vue professionnel et personnel. Il m'a permis d'approfondir certaines connaissances en télédétection et système d'information géographique et d'en acquérir de nouvelles (séries temporelles et batches). La réalisation d'une synthèse bibliographique complète à partir de la littérature scientifique, m'a poussé à organiser des informations diverses et à les restituer, de l'anglais vers le français. Ce travail m'a aidé à développer un esprit de synthèse et m'a permis de progresser dans la compréhension de l'anglais scientifique.

Le double objectif du stage, qui consistait d'une part à produire une synthèse bibliographique et d'autre part à traiter des images MODIS m'a obligée à développer un certain sens de l'organisation.

Cette expérience très intéressante m'a conforté dans mon orientation et mes choix professionnels.

De plus, il se termine par un contrat de 2 mois au sein du CIRAD pour la rédaction d'un article sur les paramètres de l'eau détectables par les outils de la télédétection.

---

## ***Bibliographie***

Alpers, H. (1984). "A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar." *Journal of Geophysical Research* 89(C 14): 10529-10546.

Baghdadi, N., J. P. Fortin, et al. (1999). "Accuracy of wet snow mapping using simulated Radarsat backscattering coefficients from observed snow cover characteristics." *International Journal of Remote Sensing* 20(10): 2049-2068.

Baghdadi, N., R. Pedreros, et al. (2007). "Impact of polarization and incidence of the ASAR sensor on coastline mapping: example of Gabon." *International Journal of Remote Sensing* 28(17): 3841-3849.

Bierwirth, P. N., Lee, T. J., Burne, R. V. (1993). "Shallow Sea-Floor Reflectance and Water Depth Derived by Unmixing multispectral Imagery." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 59(3): 331-338

Brown, J. D., D. E. Swayne, et al. (2007). "Persistence of H5 and H7 avian influenza viruses in water." *Avian Diseases* 51(1): 285-289.

Chen, H. L., Y. B. Li, et al. (2006). "Properties and dissemination of H5N1 viruses isolated during an influenza outbreak in migratory waterfowl in western China." *Journal of Virology* 80(12): 5976-5983.

Chen, Z. Q., C. M. Hu, et al. (2007). "Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery." *Remote Sensing of Environment* 109(2): 207-220.

Cheng, Y. B., S. L. Ustin, et al. (2008). "Water content estimation from hyperspectral images and MODIS indexes in Southeastern Arizona." *Remote Sensing of Environment* 112(2): 363-374.

Clark L., H. J. (2006). "Avian influenza in wild birds : status as reservoirs, and risks to humans and agriculture." *Ornithological Monographs* 2006(60): 3-29.

Conan, A. (2008) "Mise en place d'une définition Clinique d'un cas d'Influenza aviaire hautement pathogène (H5N1) en élevage villageois au Cambodge », Mémoire de Master 2, Santé publique Paris XI et Sciences et santé Paris XII, spécialité Surveillance épidémiologique des maladies humaines et animales.

Durand, D. (1999). "Characterisation of inland and Coastal Waters with Space Sensors." European Commission-A study for the Centre for Earth Observation (CEO).

Forget, P. (1995). "Une étude expérimentale de l'imagerie SAR des vagues." Symposium IFREMER.

Frappart F., S. F., Martinez J.M., León J.G., Cazenave A (2005). "Floodplain water storage in the Negro river basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels." *Remote Sensing of Environment* 99: 387-399.

Gao, B. C. (1996). "NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space." *Remote Sensing of Environment* 58(3): 257-266.

Giardino, C. (2001). "Detecting Chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery." *The Science of The Total Environment* 268(1-3): 19-29.

Gilbert, M. (2006). "Free-grazing Ducks and Highly Pathogenic Avian Influenza, Thailand." *Emerging Infectious Diseases* 12(2): 227-234.

Gilbert, M. (2008). "Mapping H5N1 highly pathogenic avian influenza risk in southeast Asia." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(12): 4769-4774.

Gilbert, M., X. M. Xiao, et al. (2006). "Avian influenza, domestic ducks and rice agriculture in Thailand." *Agriculture Ecosystems & Environment* 119(3-4): 409-415.

Gilbert, M., X. M. Xiao, et al. (2007). "Ecoregional dominance in spatial distribution of avian influenza (H5N1) outbreaks - In response." *Emerging Infectious Diseases* 13(8): 1271-1271.

Guyot, G. (1989). *Signatures spectrales des surfaces naturelles*. Caen.

Handcock, R. N., A. R. Gillespie, et al. (2006). "Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales." *Remote Sensing of Environment* 100(4): 427-440.

Harma, P., J. Vepsalainen, et al. (2001). "Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland." *Science of the Total Environment* 268(1-3): 107-121.

Hennings, A. e. (1984). "A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar." *Journal of Geophysical Research* 89(C 14): 10529-10546.

Hess, L. L., J. M. Melack, et al. (1995). "Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the Sir-C Synthetic-Aperture Radar." *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(4): 896-904.

Hu, C. M., Z. Q. Chen, et al. (2004). "Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL." *Remote Sensing of Environment* 93(3): 423-441.

Ito, T., K. Okazaki, et al. (1995). "Perpetuation of Influenza-a Viruses in Alaskan Waterfowl Reservoirs." *Archives of Virology* 140(7): 1163-1172.

J.Guo (2005). "Study on the highly pathogenic avian influenza epidemic using land surface temperature from MODIS data." *International Geoscience and Remote Symposium* 5: 3599/3602.

Khalenkov (2008). "Detection and isolation of H5N1 influenza virus from large volumes of natural water." *Journal of Virological Methods*.

Koponen, S. (2004). "Water quality classification of lakes using 250m-MODIS data." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 1(4): 287-291.

Lacaux, J. P., Y. M. Tourre, et al. (2007). "Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal." *Remote Sensing of Environment* 106(1): 66-74.

Leung, Y. H. C., L. J. Zhang, et al. (2007). "Poultry drinking water used for avian influenza surveillance." *Emerging Infectious Diseases* 13(9): 1380-1382.

LeToan, T., F. Ribbes, et al. (1997). "Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results." *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(1): 41-56.

Leung, Y. H. C., L. J. Zhang, et al. (2007). "Poultry drinking water used for avian influenza surveillance." *Emerging Infectious Diseases* 13(9): 1380-1382.

- Lyzenga, D. R. (1981). "Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data." *International Journal of Remote Sensing* 10: 53-69.
- Martin, V., S. von Dobschuetz, et al. (2007). "Early warning, database, and information systems for avian influenza surveillance." *Journal of Wildlife Diseases* 43(3): S71-S76.
- McFeeters, S.K. (1996). "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features." *International Journal of Remote Sensing* 17(7): 1425-1432.
- Panigrahy, S., K. R. Manjunath, et al. (1999). "Evaluation of RADARSAT Standard Beam data for identification of potato and rice crops in India." *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54(4): 254-262.
- Pfeiffer, D. U., P. Q. Minh, et al. (2007). "An analysis of the spatial and temporal patterns of highly pathogenic avian influenza occurrence in Vietnam using national surveillance data." *Veterinary Journal* 174(2): 302-309.
- Phuong, D. Q. (2005). "The survivability of H5N1 avian influenza virus in different types of surface water."
- Pope, K. O., E. Rejmankova, et al. (1997). "Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan Peninsula with SIR-C polarimetric radar imagery." *Remote Sensing of Environment* 59(2): 157-166.
- Quegan, S., Le Toan, T. (1998). *Analysing multitemporal SAR images. Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.*
- Reinart, A. and M. Reinhold (2008). "Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data." *Remote Sensing of Environment* 112(2): 603-611.
- Rundquist, D. C., Lawson, M.P., Queen, L.P., Ceverny, R.S. (1987). "The relationship between summer-season rainfall events and lake-surface area." *Water Resources Bulletin* 23: 493-508.
- Sakamoto, T., N. Van Nguyen, et al. (2007). "Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery." *Remote Sensing of Environment* 109(3): 295-313.
- Sakamoto, T., N. Van Nguyen, et al. (2006). "Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers." *Remote Sensing of Environment* 100(1): 1-16.
- Sakamoto, T., M. Yokozawa, et al. (2005). "A crop phenology detection method using time-series MODIS data." *Remote Sensing of Environment* 96(3-4): 366-374.
- Seyhan E., D. A. (1986). "Application of remote sensing techniques for water quality monitoring." *Hydrological bulletin* 20: 41-50.
- Shao Y., L., H., Fan X. (2000). "SAR technology for operational rice monitoring." *Geoscience and Remote Sensing Symposium* 4: 1486 - 1488.
- Shortridge, K. F. (1998). "Characterization of Avian H5N1 Influenza Viruses from Poultry in Hong Kong." *Virology* 252(2): 331-342.
- Sitthisak Moukomla, A. P. (2004). "Rapid response Spatial Information System : Avian Influenza in Thailand." *Map Asia Conference 2004/ GISDevelopment.net.*

- Smith, L. C. (1997). "Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review." *Hydrological Processes* 11(10): 1427-1439.
- Songserm, T. (2006). "Domestic Ducks and H5N1 Influenza Epidemic, Thailand." *Emerging Infectious Diseases* 12(4): 575-581.
- Stallknecht, D. E. (1990). "Effects of pH, Temperature, and Salinity on Persistence of Avian Influenza Viruses in Water." *Avian Diseases* 34(2): 412-418.
- Tiensin, T., P. Chaitaweesub, et al. (2005). "Highly pathogenic avian influenza H5N1, Thailand, 2004." *Emerging Infectious Diseases* 11(11): 1664-1672.
- Tiensin, T., M. Nielen, et al. (2006). "Geographic and temporal distribution of highly pathogenic avian influenza A virus (H5N1) in Thailand, 2004-2005: An overview." *Avian Diseases* 51(1): 182-188.
- Torgersen, C. E., R. N. Faux, et al. (2001). "Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams." *Remote Sensing of Environment* 76(3): 386-398.
- Townshend, J. R. G., Justice, C.O. (1986). "Analysis of the dynamics of African vegetation using the Normalized Vegetation Index." *International Journal of Remote Sensing* 7: 1395-1416.
- Tucker, c., Sellers, P.J. (1986). "Satellite remote sensing of primary productivity " *International Journal of Remote Sensing* 7: 1395-1416.
- Verdin, J. P. (1985). "Monitoring water quality conditions in a large Western reservoir with Landsat imagery." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 51(3): 343-353.
- Wass, P. D., S. D. Marks, et al. (1997). "Monitoring and preliminary interpretation of in-river turbidity and remote sensed imagery for suspended sediment transport studies in the Humber catchment." *Science of the Total Environment* 194: 263-283.
- White, M., E. (1978). "Reservoir surface area from Landsat imagery." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44: 1421-1426.
- Wilson, E. H. and S. A. Sader (2002). "Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery." *Remote Sensing of Environment* 80(3): 385-396.
- Wloczyk, C., R. Richter, et al. (2006). "Sea and lake surface temperature retrieval from Landsat thermal data in Northern Germany." *International Journal of Remote Sensing* 27(12): 2489-2502.
- Work, E. G., D.S. (1976). "Utilization of satellite data for inventorying prairie ponds and lakes." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 42: 685-694.
- Wu Y.B, P. S. P., Huang M., Wu, G.M. (2007). "Quantitative analysis of water depth in Huainan ponding subsidence based on remote sensing." *Journal of China University of Mining and Technology* 36(4): 537-541.
- Xiao (2006). "HPAI Risk Analysis for West Siberian Lowlands/Palaearctic Areas."
- Xiao, X. M., S. Boles, et al. (2006). "Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images." *Remote Sensing of Environment* 100(1): 95-113.
- Xiao, X. M., S. Boles, et al. (2005). "Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images." *Remote Sensing of Environment* 95(4): 480-492.

Xiao, X. M., M. Gilbert, et al. (2007). "Remote sensing, ecological variables, and wild bird migration related to outbreaks of highly pathogenic H5N1 avian influenza." *Journal of Wildlife Diseases* 43(3): S40-S46.

Xu, H. Q. (2006). "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing* 27(14): 3025-3033.

Zarkov, I. S. (2006). "Survival of avian influenza viruses in filtered and natural surface waters of different physical and chemical parameters." *Revue De Medecine Veterinaire* 157(10): 471-476.

Zhan, X., R. Defries, et al. (2000). "The 250 m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System." *International Journal of Remote Sensing* 21(6-7): 1433-1460.

Zhan, X., R. A. Sohlberg, et al. (2002). "Detection of land cover changes using MODIS 250 m data." *Remote Sensing of Environment* 83(1-2): 336-350.

Sites Internet

[http://www.fao.org/index\\_fr.htm](http://www.fao.org/index_fr.htm)

<http://www.who.int/>

[http://www.oie.int/fr/fr\\_index.htm](http://www.oie.int/fr/fr_index.htm)

<http://www.manuguerra.eu/rivers/>

## Annexes

Bande	Longueur d'onde réfléchie (nm)	Longueur d'onde émise (um)	Résolution (mètres)	Clé d'utilisation
1	620-670 (rouge)		250	<i>Absolute Land Cover Transformation, Vegetation Chlorophyll</i>
2	841-876 (NIR)		250	<i>Cloud Amount, Vegetation Land Cover Transformation</i>
3	459-479 (bleu)		500	<i>Soil/Vegetation Differences</i>
4	545-565 (vert)		500	<i>Green Vegetation</i>
5	1230-1250 (MIR)		500	<i>Leaf/Canopy Differences</i>
6	1628-1652 (MIR)		500	<i>Snow/Cloud Differences</i>
7	2105-2155 (MIR)		500	<i>Cloud Properties, Land Properties</i>
8	405-420 (violet)		1000	<i>Chlorophyll</i>
9	438-448 (violet)		1000	<i>Chlorophyll</i>
10	483-493 (bleu)		1000	<i>Chlorophyll</i>
11	526-536 (vert)		1000	<i>Chlorophyll</i>
12	546-556 (vert)		1000	<i>Sediments</i>
13	h 662-672 (rouge)		1000	<i>Atmosphere, Sediments</i>
13	l 662-672 (rouge)		1000	<i>Atmosphere, Sediments 14h 673-683 Chlorophyll Fluorescence</i>
14	l 673-683 (rouge)		1000	<i>Chlorophyll Fluorescence</i>
15	743-753 (NIR)		1000	<i>Aerosol Properties</i>
16	862-877 (NIR)		1000	<i>Aerosol Properties, Atmospheric Properties</i>
17	890-920 (NIR)		1000	<i>Atmospheric Properties, Cloud Properties</i>
18	931-941 (NIR)		1000	<i>Atmospheric Properties, Cloud Properties</i>
19	915-965 (NIR)		1000	<i>Atmospheric Properties, Cloud Properties</i>
20		3.660-3.840	1000	<i>Sea Surface Temperature</i>
21		3.929-3.989	1000	<i>Forest Fires &amp; Volcanoes</i>
22		3.929-3.989	1000	<i>Cloud Temperature, Surface Temperature</i>
23		4.020-4.080	1000	<i>Cloud Temperature, Surface Temperature</i>
24		4.433-4.498	1000	<i>Cloud Fraction, Troposphere Temperature</i>
25		4.482-4.549	1000	<i>Cloud Fraction, Troposphere Temperature</i>
26	1360-1390		1000	<i>Cloud Fraction (Thin Cirrus), Troposphere Temperature</i>
27		6.535-6.895	1000	<i>Mid Troposphere Humidity</i>
28		7.175-7.475	1000	<i>Upper Troposphere Humidity</i>
29		8.400-8.700	1000	<i>Surface Temperature</i>
30		9.580-9.880	1000	<i>Total Ozone</i>
31		10.780-11.280	1000	<i>Cloud Temperature, Forest Fires &amp; Volcanoes, Surface Temp.</i>
32		11.770-12.270	1000	<i>Cloud Height, Forest Fires &amp; Volcanoes, Surface Temperature</i>
33		13.185-13.485	1000	<i>Cloud Fraction, Cloud Height</i>
34		13.485-13.785	1000	<i>Cloud Fraction, Cloud Height</i>
35		13.785-14.085	1000	<i>Cloud Fraction, Cloud Height</i>
36		14.085-14.385	1000	<i>Cloud Fraction, Cloud Height</i>

Annexe 1. — Bandes du capteur MODIS.

## MOD09A1

MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V005

Data Set Characteristics:

Area: ~10 degrees x 10 degrees lat/long

File Size: ~64 MB

Projection: Sinusoidal

Data Format: HDF-EOS

Dimensions: 2400 x 2400 rows/columns

Resolution: 500 meters

Science Data Sets (SDS HDF Layers):

### Product Description

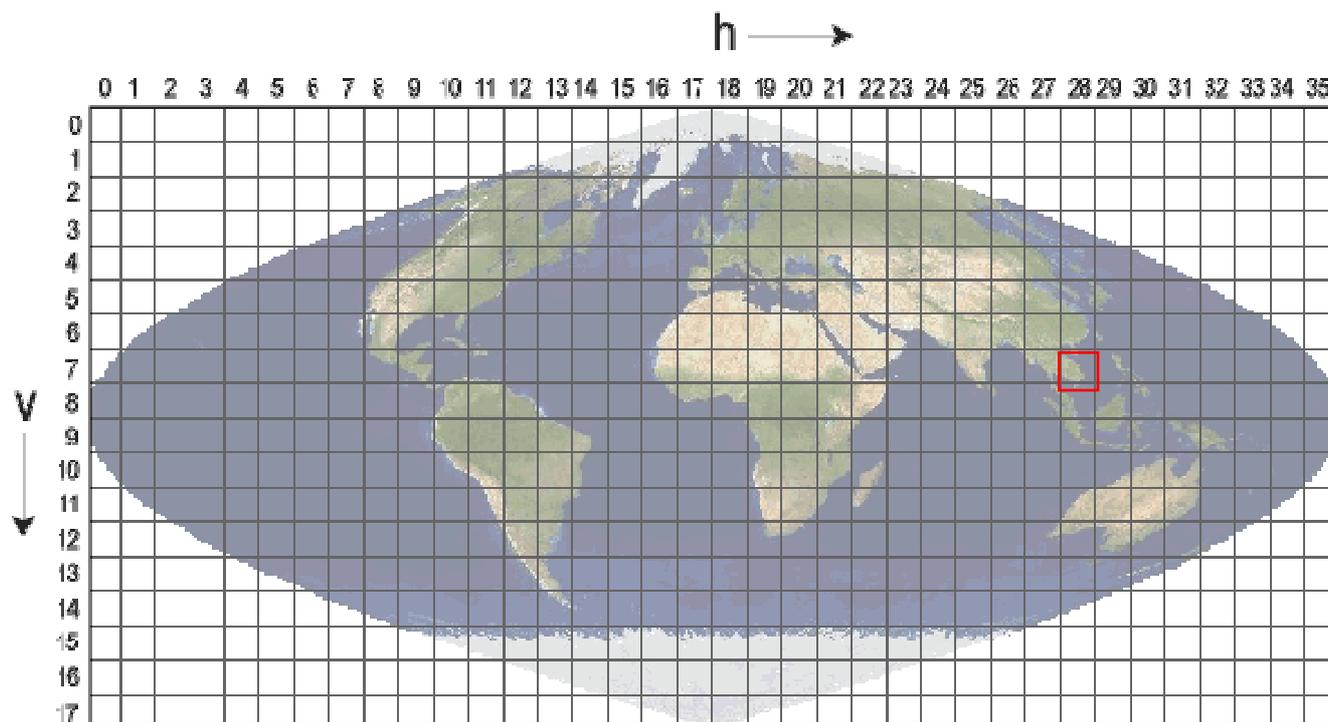
The MODIS Surface Reflectance products provide an estimate of the surface spectral reflectance as it would be measured at ground level in the absence of atmospheric scattering or absorption. Low-level data are corrected for atmospheric gases and aerosols, yielding a level-2 basis for several higher-order gridded level-2 (L2G) and level-3 products.

MOD09A1 provides [Bands 1-7](#) at 500-meter resolution in an 8-day gridded level-3 product in the Sinusoidal projection. Each MOD09A1 pixel contains the best possible L2G observation during an 8-day period as selected on the basis of high observation coverage, low view angle, the absence of clouds or cloud shadow, and aerosol loading. Science Data Sets provided for this product include reflectance values for Bands 1-7, quality assessment, and the day of the Sinusoidal projection. Each MOD09A1 pixel contains the best possible L2G observation during an 8-day period as selected on the basis of high observation coverage, low view angle, the absence of clouds or cloud shadow, and aerosol loading. Science Data Sets provided for this product include reflectance values for Bands 1-7, quality assessment, and the day of the year for the pixel along with solar, view, and zenith angles.

Version-5 MODIS/Terra Surface Reflectance products are Validated Stage 1, meaning that accuracy has been estimated using a small number of independent measurements obtained from selected locations and time periods and ground-truth/field program efforts. Although there may be later improved versions, these data are ready for use in scientific publications.

*Annexe 2. — Description du produit de synthèse MODIS MOD09A1*

## MODIS Sinusoidal Grid

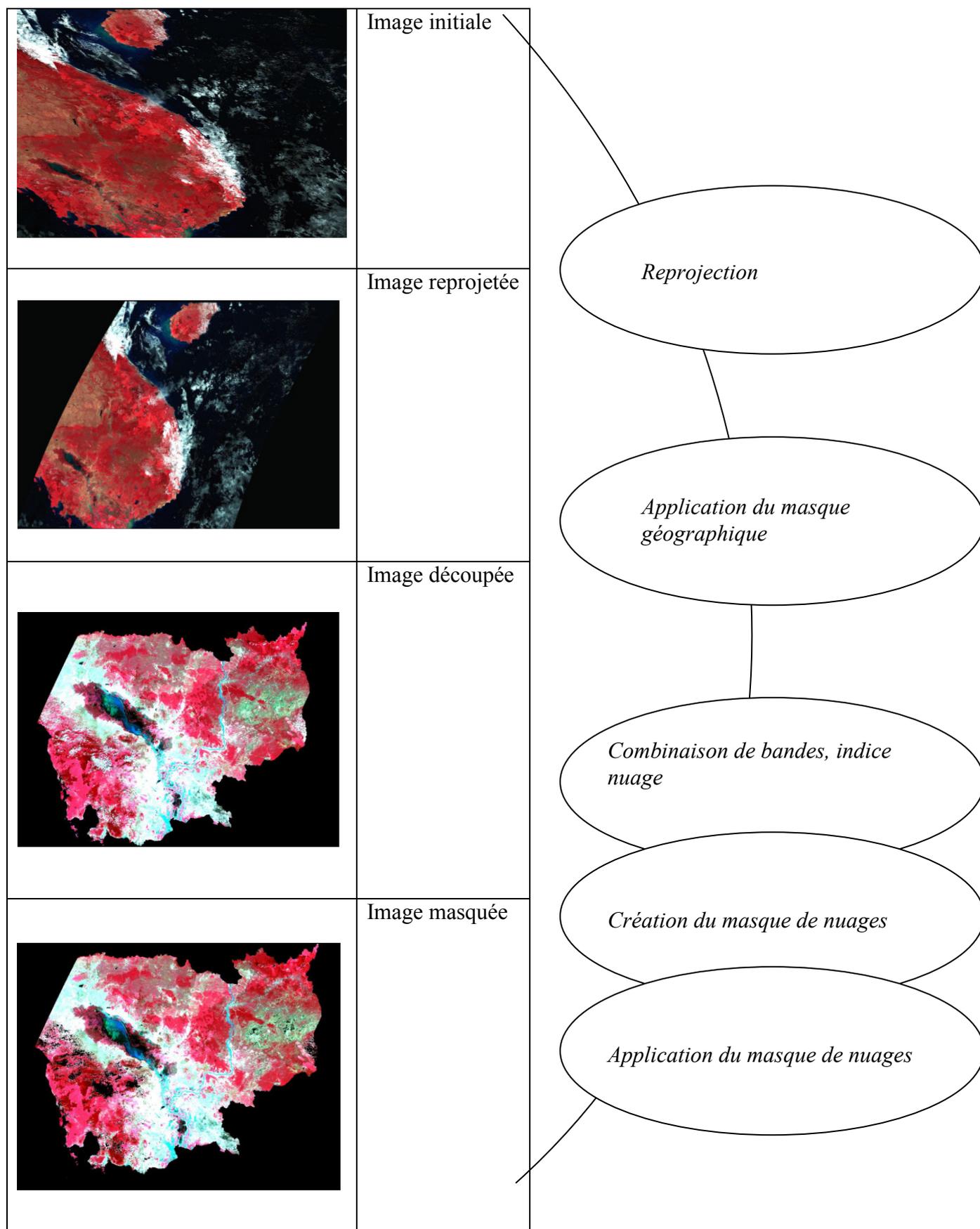


Annexe 3. — Grille sinusoidale, MODIS

### Data ordering (& browsing)

- a) EOS (Earth Observing System) Data Gateway  
La principale source de données, et tutoriel.  
<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>
- b) LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center)  
Informations utiles et liens, accès par FTP à l'ensemble des produits *Land* de MODIS:  
<http://edcdaac.usgs.gov/main.asp>
- c) US Geological Survey (USGS) Global Visualization (GloVIS)  
L'accès à certains produits *Land* de MODIS, avec capacité de navigation.  
<http://glovis.usgs.gov/>
- d) MODIS Land Global Browse Images  
Versions 5 km de certains produits de synthèse, évaluation de la qualité  
*Link:* <http://landweb.nascom.nasa.gov/cgi-bin/browse/browse.cgi>
- e) Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility  
Compositions 32 jours, Images en format GeoTiff, produits limités.  
*Link:* <http://landcover.org/index.shtml>

**Annexe 4.** — Possibilités de téléchargement de données MODIS et informations pour les produits.



Annexe 5. — Prétraitements des images MODIS.

Annexe 6. — *Batches*

```

forward_function envi_proj_create

pro envi_convert_file_map_projection
;
; First restore all the base save files.
;
envi, /restore_base_save_files
;
; Initialiser ENVI et trouver les erreurs
; ; Trouver les fichier à reprojetter

envi_batch_init, log_file='batch.txt'
files = FINDFILE ('E:\lisechamaille\MOD13Q1\MOD13Q1.A*.hdf', count=count)
;
; Ouvrir les fichier
;
print, count
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files(i), r_fid=fid
print,r_fid
if (fid eq -1) then begin
  envi_batch_exit
  return
endif
;
; Rentrer les parameters clés
;
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, sname=sname
pos = lindgen(nb)
dims = [-11, 0, ns-1, 0, nl-1]
out_name = sname
o_proj = envi_proj_create(/utm, zone=49, datum='South Asia, Modified Fischer 1960, 7, -10, -26')
o_pixel_size = [500, 500]
;
; Appeler le 'doit'
;
envi_convert_file_map_projection, fid=fid, $
  pos=pos, dims=dims, o_proj=o_proj, $
  o_pixel_size=o_pixel_size, grid=[50,50], $
  out_name=out_name, warp_method=2, $
  resampling=1, background=0

endfor
; Sortir d'ENVI
;
envi_batch_exit
end

```

*Batch Reprojection*

```

forward_function envi_mask_create

pro envi_apply_mask
;
; Initialiser ENVI et trouver les erreurs.
ENVI, /RESTORE_BASE_SAVE_FILES
ENVI_BATCH_INIT, LOG_FILE = 'batch_log.txt'

; Trouver les fichiers à masquer
envi_batch_init, log_file='batch.txt'
files = FINDFILE ('E:\lisechamaille\MOD09A1Gnew2\MOD09A1.A*.hdf, count=count)
; Ouvrir les fichiers
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files(i), r_fid=fid
; Ouvrir le fichier masque
ENVI_OPEN_FILE, 'E:\lisechamaille\MOD09A1Gnew\masque.img', R_FID = m_fid
if (fid eq -1) then begin
envi_batch_exit
return
endif

; Rentrer les paramètres clés.
ENVI_FILE_QUERY, fid, dims=dims, NS = ns, NL = nl, NB = nb, sname=sname
pos = lindgen(nb)
out_name = sname
m_pos = [0]
o_pixel_size = [500, 500]

; Appliquer le 'doit'
ENVI_MASK_APPLY_DOIT, FID = fid, POS = pos, DIMS = dims, $
M_FID = m_fid, M_POS = m_pos, VALUE = 0, OUT_NAME = out_name, $
IN_MEMORY = 0, R_FID = r_fid

; Sortir d'ENVI
Endfor
ENVI_BATCH_EXIT

END

```

*Batch Application du masque*

```

forward_function example_math_doit

pro envi_math_doit
;
envi, /restore_base_save_files
;
; Initialiser ENVI et trouver les erreurs
; Trouver les fichier

envi_batch_init, log_file='batch.txt'
files = FINDFILE ('D:\MOD09A1Nselec\MOD09A1.A*.hdf', count=count)

; Ouvrir les fichier
print, count
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files(i), r_fid=fid
if (fid eq -1) then begin
    envi_batch_exit
    return
endif
;
; Rentrer les parameters clés
;
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, dims=dims, sname=sname
t_fid = [fid,fid]
;Sélectionner les bandes pour définir la combinaison
pos = [3,2]
; Définir la combinaison de bandes
exp = '(b3-b2)/(b3+b2)'
out_name = sname
;
; Appler doit
;
envi_doit, 'math_doit', $
    fid=t_fid, pos=pos, dims=dims, $
    exp=exp, out_name=out_name, $
    r_fid=r_fid

endfor
; Sortir d' ENVI
;
envi_batch_exit
end

```

*Batch Combinaison de bandes*

```

forward_function example_mas

pro create_msk
;
envi,/restore_base_save_files
;
; Initialiser ENVI et trouver les erreurs
; ; Trouver les fichiers

;
envi_batch_init, log_file='batch.txt'

files = FINDFILE ('E:\lisechamaille\b3-b41\MOD09A1.A*.hdf', count=count)
; Ouvrir les fichier

print, count
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files(i), r_fid=fid
if (fid eq -1) then begin
envi_batch_exit
return
endif
;

; Rentrer les parameters clés
;
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, dims=dims, sname=sname

; Prendre les données utiles du fichier (dimensions, identifiant)
data = ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
; Définir un tableau ayant n lignes et n colonnes (selons les dimensions du fichier initial
récupéré ci-dessus)
nuage = fltarr(ns, nl)
; La valeur du pixel doit être supérieure ou égale à -0.13
nuage = data GE -0.13
write_tiff, 'C:\Documents and Settings\chamail\Bureau\nuage.tif', nuage ; écriture de l'image

endfor
end

```

*Batch Création du masque de nuages*

```

forward_function envi_mask_create
pro envi_apply_mask
; First restore all the base save files.
ENVI, /RESTORE_BASE_SAVE_FILES
; Initialiser ENVI et trouver les erreurs
; Trouver les fichier
ENVI_BATCH_INIT, LOG_FILE = 'batch_log.txt'

; Trouver les fichiers à masquer
files = FINDFILE ('E:\lisechamaille\MOD09A1Mbis\MOD09A1.A*.hdf',
count=count)
; Ouvrir les fichiers
;
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files(i), r_fid=fid
if (fid eq -1) then begin
envi_batch_exit
return
endif
; Trouver les fichiers qui vont servir de masques
files2 = FINDFILE ('C:\Documents and
Settings\chamaill\Bureau\nMOD09A1.A*.hdf', count=count)
; Ouvrir les fichiers masques
FOR j=0,count-1 DO BEGIN
envi_open_data_file, files2(j), r_fid=fid
if (fid eq -1) then begin
envi_batch_exit
return
endif

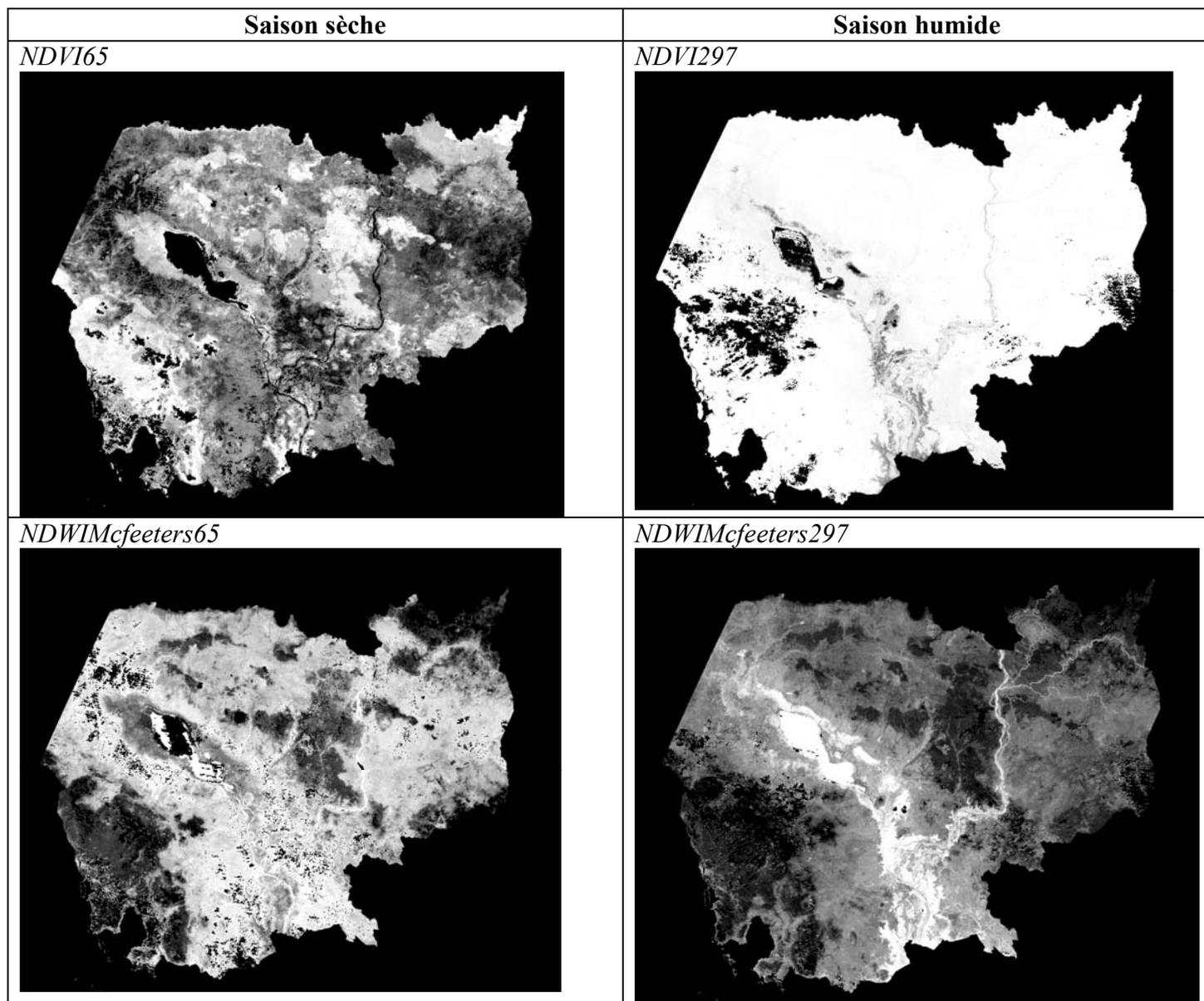
; Prendre les informations du fichier à masquer
; rentrer les paramètres clés
ENVI_FILE_QUERY, fid, dims=dims, NS = ns, NL = nl, NB = nb, sname=sname
pos = lindgen(nb)
out_name = sname
m_pos = [0]
o_pixel_size = [500, 500]

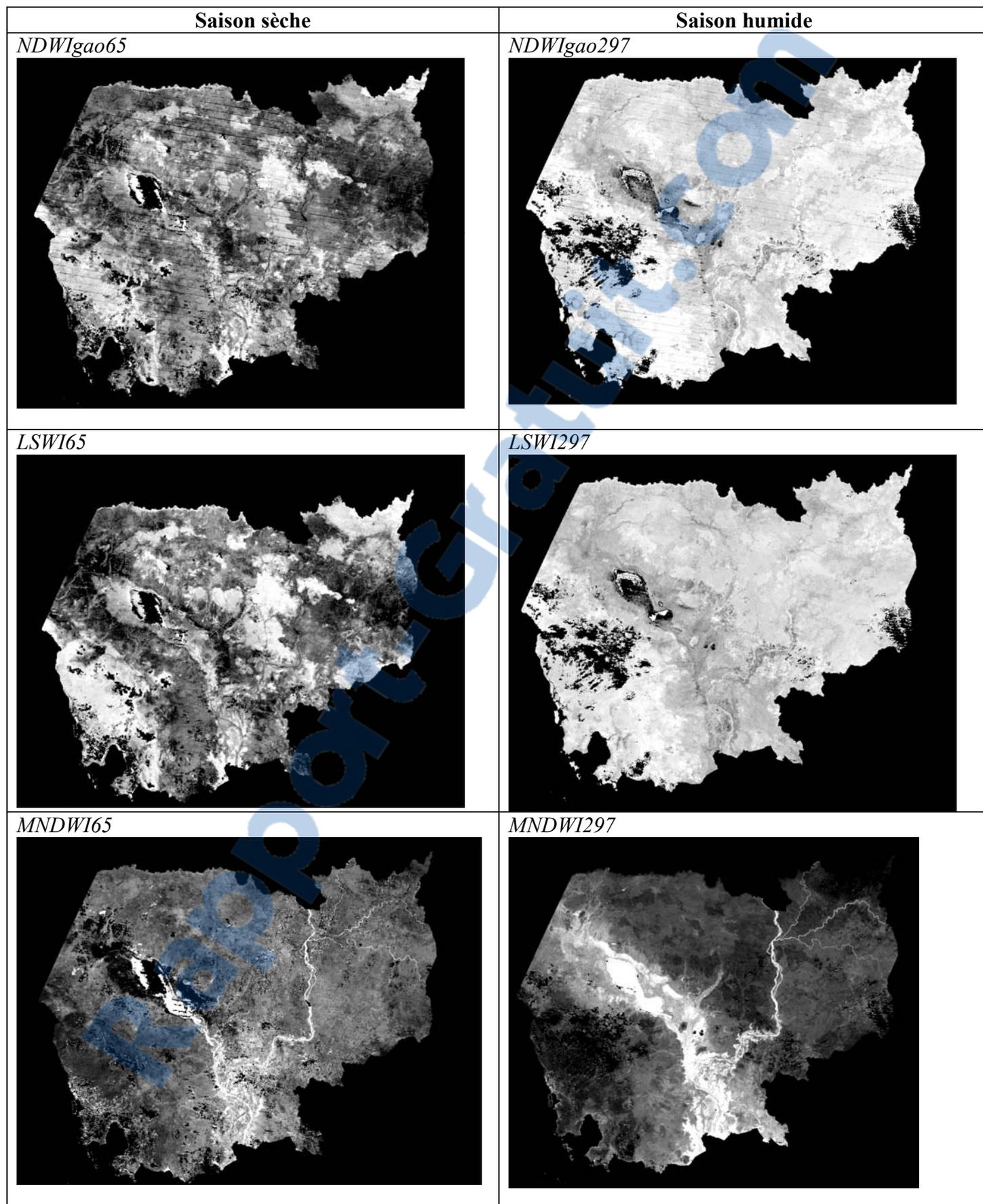
; Appeler le 'doit'
ENVI_MASK_APPLY_DOIT, FID = fid, POS = pos, DIMS = dims, $
M_FID = m_fid, M_POS = m_pos, VALUE = 0, OUT_NAME = out_name, $
IN_MEMORY = 0, R_FID = r_fid

; Exit ENVI
Endfor
Endfor
ENVI_BATCH_EXIT
END

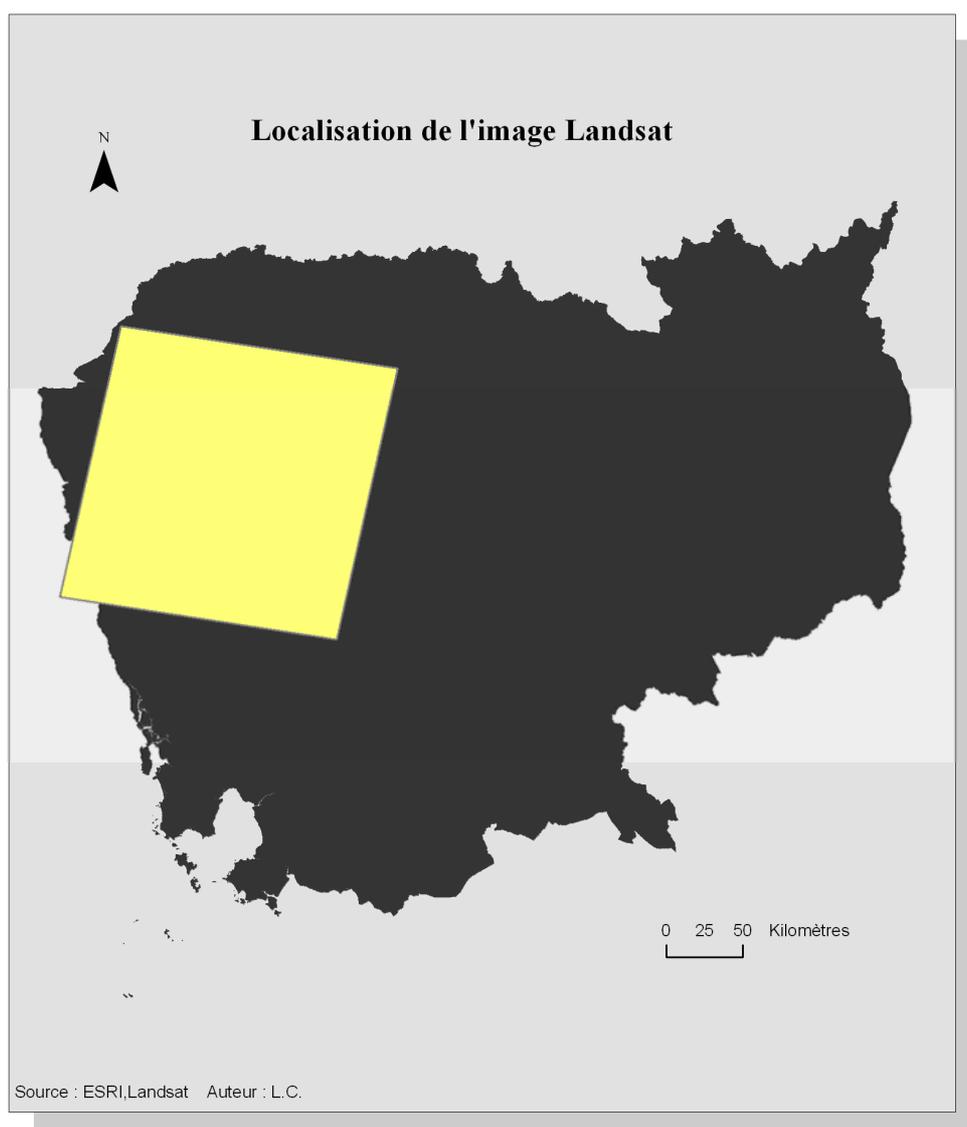
```

Batch application du masque de nuages

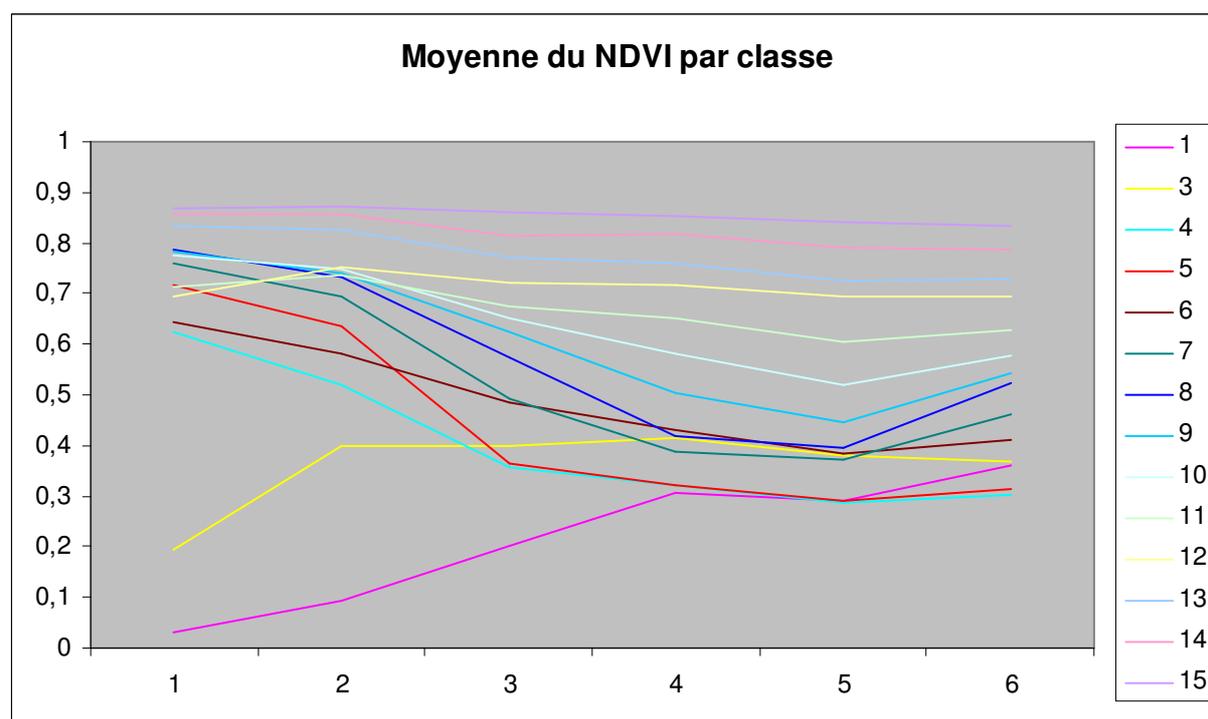
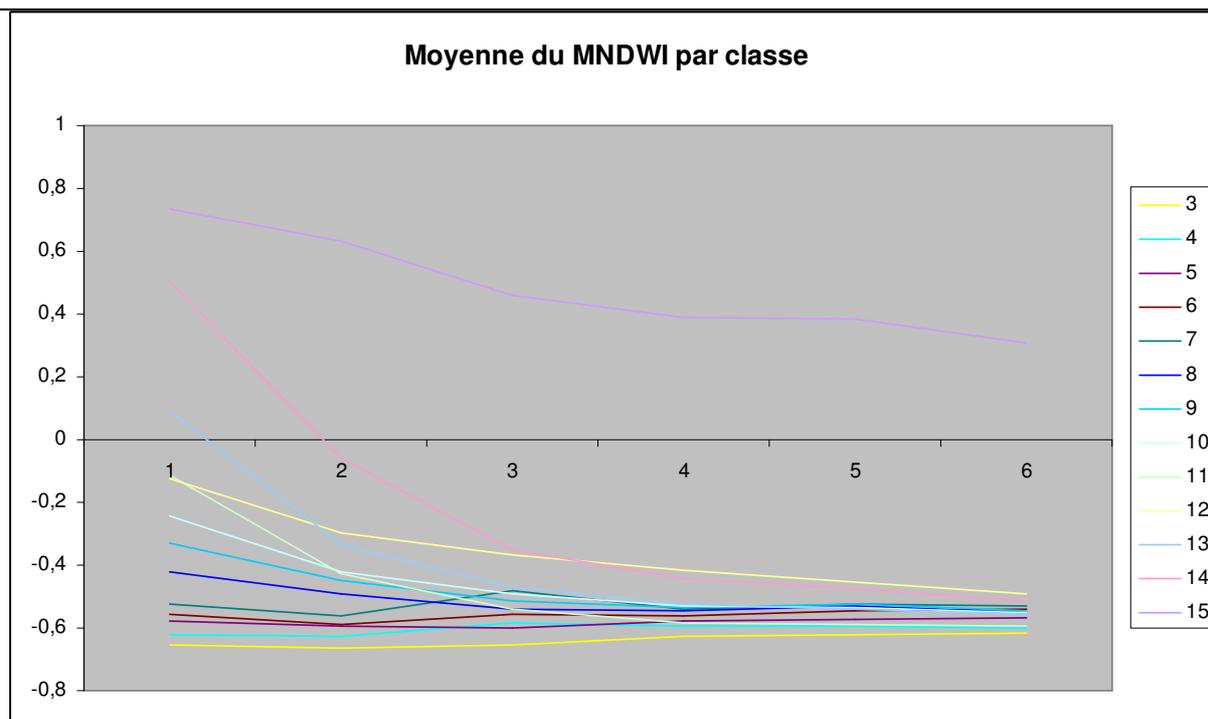




Annexe 7. — Test des indices pour détecter l'eau pendant la saison sèche (65) et la saison humide (297)

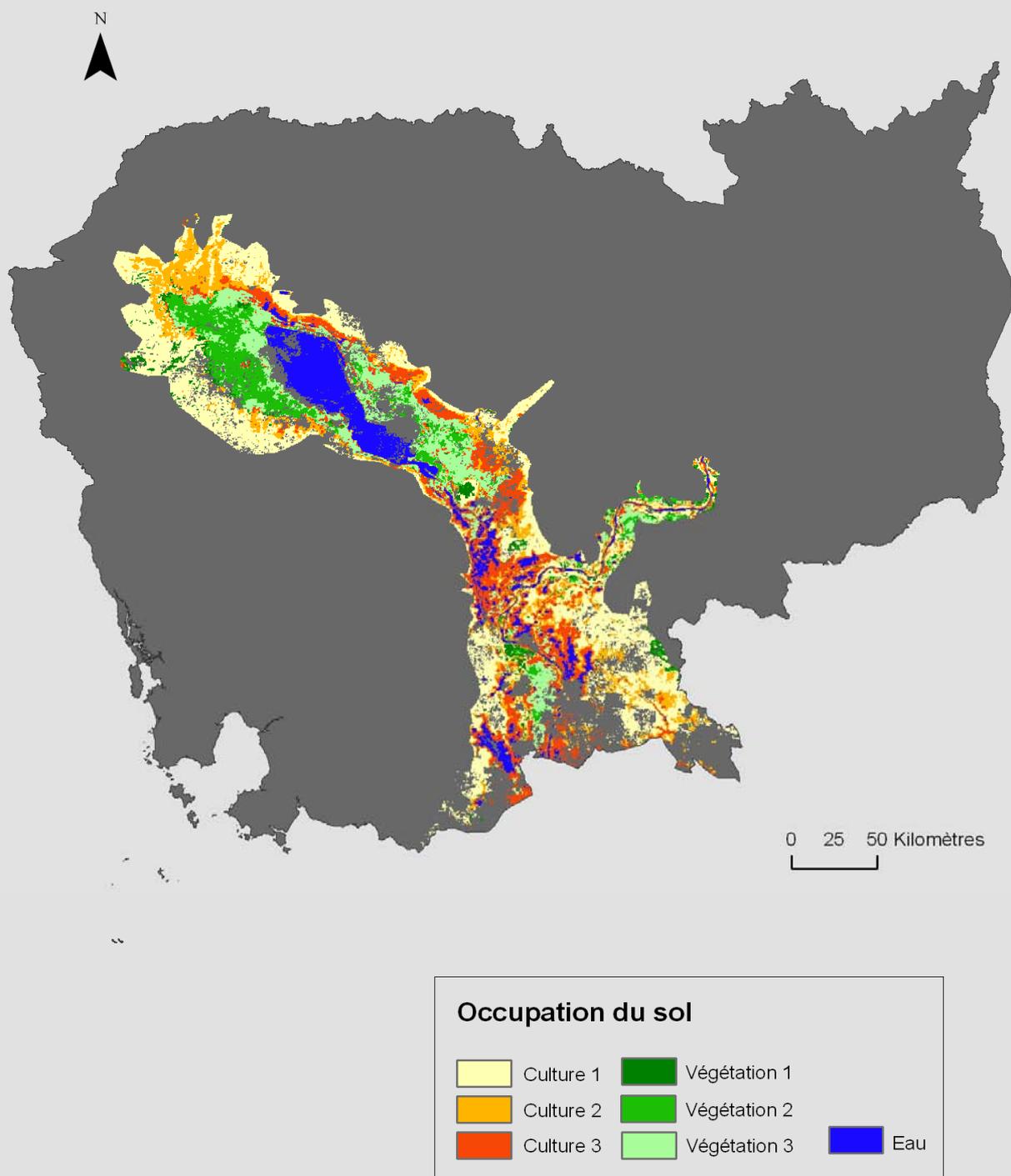


**Annexe 8.** — *Localisation de l'image Landsat*



**Annexe 9.** — Valeur moyenne des indices MNDWI et NDVI par classe pendant la saison sèche 2006-2007 (classification non supervisée, méthode des nuées dynamiques)

## Occupation du sol dans les zones inondées pendant la saison sèche au Cambodge (2006-2007)



Source : MODIS Auteur : L.C

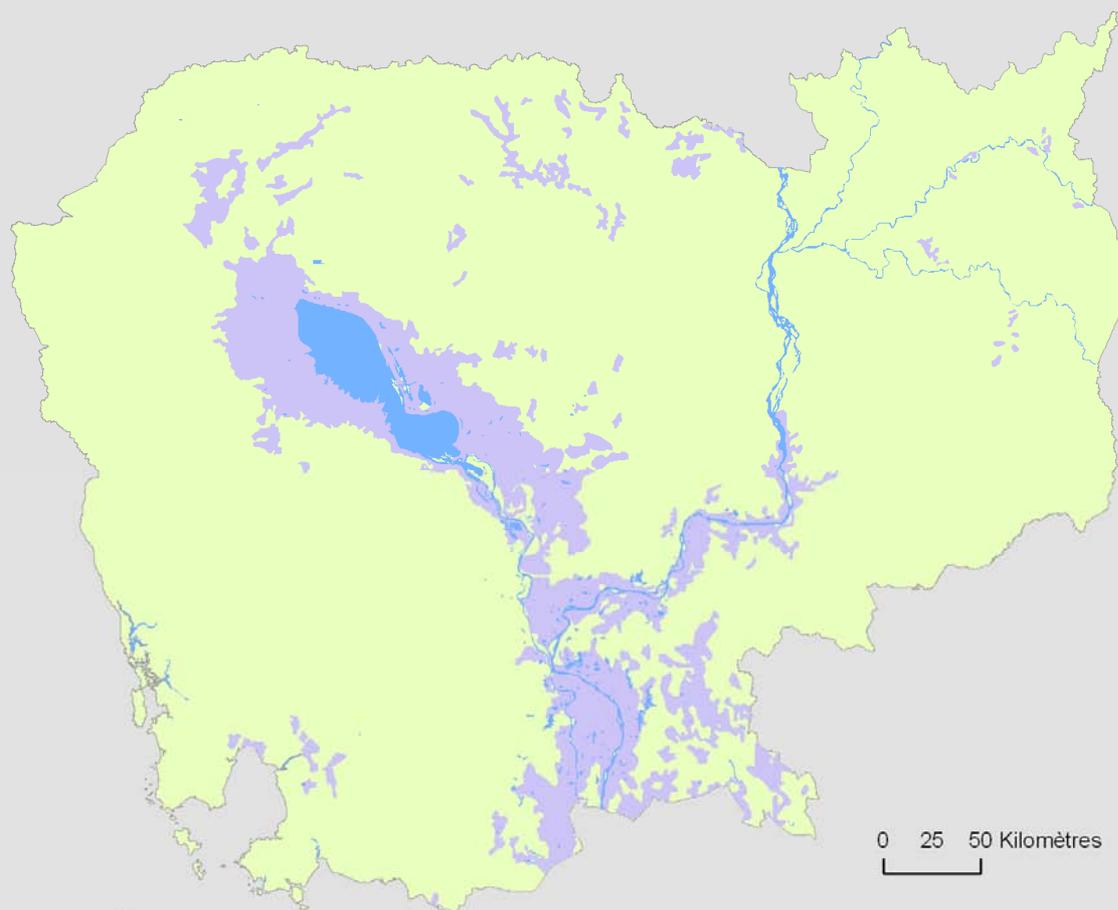
**Annexe 10.** — Occupation du sol dans les zones inondées à partir du croisement de la carte des temps d'inondation et la carte d'occupation du sol



Base 801647 (800998) 2-91

Annexe 11. — Carte du Cambodge, université du Texas, Etats-Unis.

## Eau pérenne et zones inondables



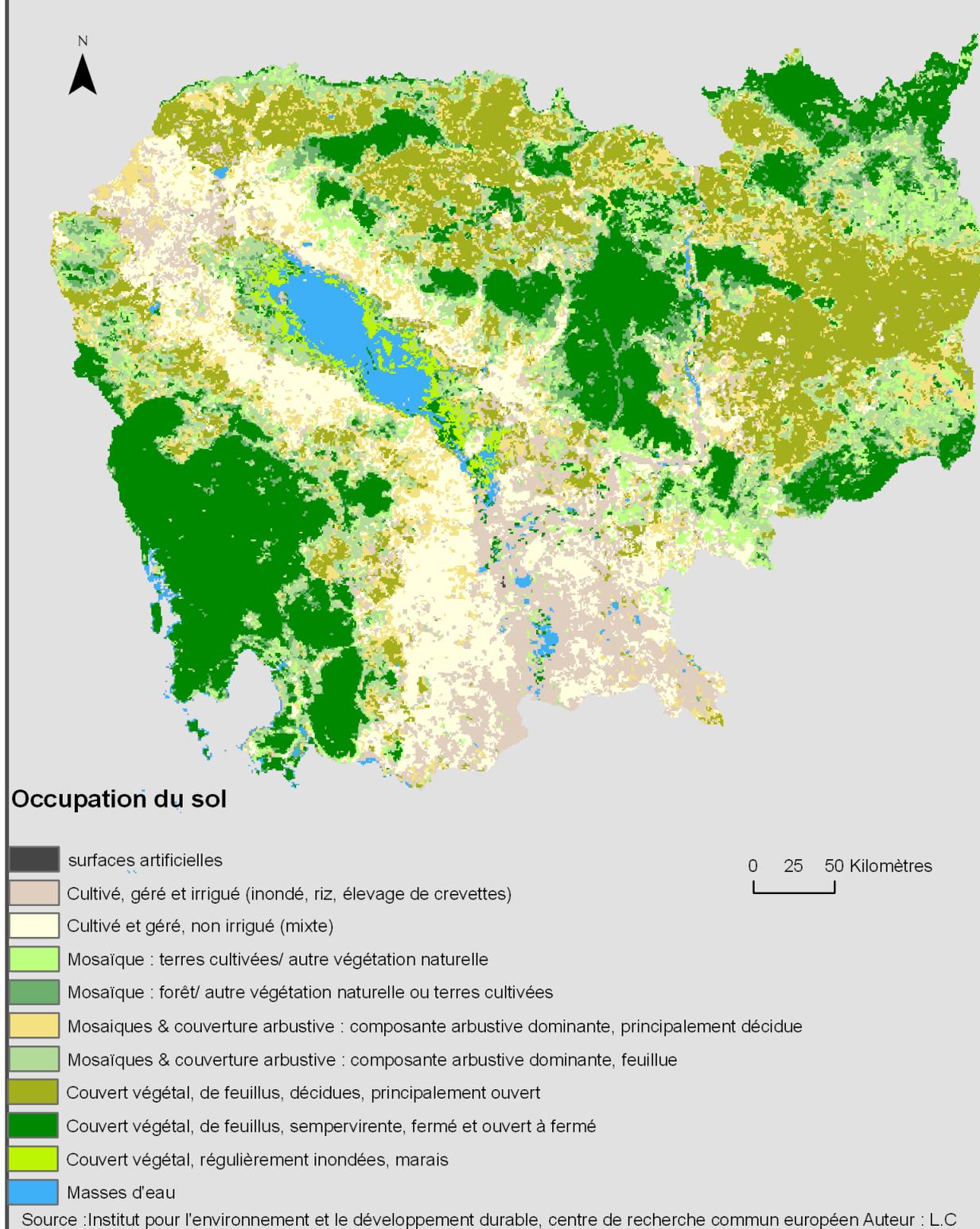
0 25 50 Kilomètres

 Eau permanente  
 Zone inondable

Source : Digital Chart of the world Auteur : L.C

**Annexe 12.** — *L'eau au Cambodge selon la charte numérique du monde (DCM)*

## Classification de l'occupation du sol en 2000 au Cambodge



Annexe 13. — *Classification de l'occupation du sol en 2000*

CLASSNAME	culture1	culture 2	culture 3	culture 4	végétation 1	végétation 2	végétation 3	végétation 4	
Sea	14,22	0	0	0	26,21	42,89	0	16,68	100
Tree cover, broa	0,79	0,31	0,66	0,04	5,66	91,43	0,12	1	100
Mosaic: Tree cov	1,89	0,4	1,14	0,08	15,86	74,42	0,26	5,95	100
Tree cover, broa	18,26	1,1	1,42	0,01	77,64	1,09	0,07	0,4	100
Tree cover, regu	0,06	1,08	10,11	1,91	0,13	24,6	3,69	58,43	100
Mosaics & Shrub	7,6	0,66	0,59	0,03	53,19	33,84	0,2	3,9	100
Mosaics & Shrub	34,54	1,97	2,05	0,03	56,93	3,27	0,12	1,1	100
Mosaic sof Cropl	4,94	0,63	0,74	0,02	45,49	45,49	0,28	2,41	100
Cultivated and m	67,93	8,21	3,27	0,03	16,25	3,19	0,26	0,85	100
Cultivated and m	41,01	15,43	17,11	0,12	19,24	3,42	0,33	3,33	100
Artificial surfa	0	100	0	0	0	0	0	0	100
Water Bodies	6,44	5,31	21,43	1,4	4,01	11,06	2,61	47,74	100

CLASSNAME	culture1	culture 2	culture 3	culture 4	végétation 1	végétation 2	végétation 3	végétation 4	
Sea	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,18	
Tree cover, broa	0,62	1,63	3,73	11,22	2,79	56,60	9,01	6,29	
Mosaic: Tree cov	0,39	0,55	1,69	5,10	2,05	12,09	5,10	9,93	
Tree cover, broa	14,39	5,91	8,11	3,06	38,79	0,69	5,40	2,60	
Tree cover, regu	0,00	0,36	3,59	30,63	0,00	0,96	17,42	23,40	
Mosaics & Shrub	4,39	2,59	2,49	6,12	19,47	15,56	11,11	18,38	
Mosaics & Shrub	16,47	6,40	7,09	4,07	17,22	1,24	5,71	4,28	
Mosaic sof Cropl	1,32	1,14	1,45	2,04	7,72	9,70	7,21	5,27	
Cultivated and m	45,57	37,52	15,95	6,12	6,91	1,71	17,12	4,68	
Cultivated and m	16,60	42,58	50,34	15,31	4,94	1,10	12,91	11,05	
Artificial surfa	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Water Bodies	0,23	1,29	5,56	16,33	0,09	0,31	9,01	13,95	
	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

**Annexe 14.** — Croisement des superficies de classes entre la classification combinée de deux indices et la classification européenne

