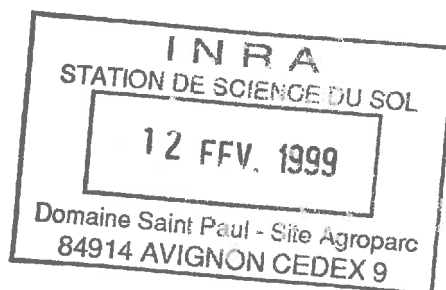


N° d'ordre : 3261



THESE

présentée en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE III

Spécialité : Télédétection appliquée à la végétation

par

Florence RIBBES

**UTILISATION DES DONNEES RADAR POUR LE SUIVI DES RIZIERES :
CARTOGRAPHIE, SUIVI DE CROISSANCE
ET ESTIMATION DU RENDEMENT**

Date de soutenance : le 11 Décembre 1998
devant la commission d'examen composée de

M. Raoul Talon	Professeur à l'Université Paul Sabatier, Toulouse	Président
M. Shaun Quegan	Professeur à l'Université de Sheffield	Rapporteur
M. Bernard Seguin	Directeur de recherche, INRA, Avignon	Rapporteur
Mme. Dominique Bachelet	Ass. Professeur à l'Oregon State University	Examineur
M. Michel Gay	Professeur à l'ESAP, Toulouse	Examineur
M. Jean-Paul Malingreau	Conseiller Direction des Programmes CCR-CE, Bruxelles	Examineur
M. Dominique Vignes	Professeur à l'Université Paul Sabatier, Toulouse	Examineur
Mme Thuy Le Toan	Ingénieur de Recherche CNRS, CESBIO, Toulouse	Directeur de thèse

A Simon,

*A mes parents
et grands-parents*

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère à Toulouse dont je remercie Monsieur P. Bauer, le Directeur.

J'exprime ma plus vive reconnaissance à :

Monsieur le professeur R. Talon pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Monsieur le professeur S. Quegan et Monsieur B. Seguin pour avoir accepté la lourde tâche de Rapporteur de mon manuscrit. Je leur suis reconnaissante de leurs remarques judicieuses et de m'avoir consacré du temps pour la correction de cette thèse.

Madame D. Bachelet et Messieurs M. Gay, J.P. Malingreau et D. Vignes d'avoir accepté de faire partie de mon Jury en temps qu'Examineur. Un remerciement tout particulier à Michel Gay qui m'a fait découvrir la télédétection et à Dominique Bachelet qui a toujours répondu à mes nombreux courriers électroniques et demandes de renseignements.

Et enfin et surtout à Mme Thuy Le Toan pour m'avoir accueillie dans son équipe et pour la qualité de son encadrement. L'intérêt qu'elle m'a témoigné et les conseils qu'elle m'a prodigués ont été particulièrement précieux dans l'élaboration de ce travail. Je la remercie également de m'aider et de m'encourager dans la poursuite de mes recherches.

Ce travail est pour moi l'occasion de remercier tout particulièrement mes amis :

Nicolas pour sa gentillesse, ses conseils avisés et pour m'avoir apporté son aide en toutes circonstances.

Les « militaires » du labo : Laurent et Oscar, qui ont fait du bureau 104 le plus sympathique et agréable du labo, et aussi et surtout Simon qui m'a supportée, conseillée et soutenue dans les moments les plus agréables comme les plus difficiles.

Patrice, compagnon de sport et ami et Valérie, ma confidente, qui m'ont aidé à surmonter mes peurs et doutes.

Mais aussi pour leur aide et leur amitié, Sophie, Malcolm, Christophe, Davor, Jérôme, Véronique, Pierre-Louis, Pierre G., Pierre M., Roger, Franck, Olivier et Selma ...

J'exprime également ma reconnaissance aux nombreux amis que j'ai pu rencontrer en Indonésie, qui m'ont accueillie chaleureusement durant mon séjour dans leur pays et qui ont été une aide précieuse dans mon travail : Agus, Atiek, Happy, Hari, Desi, Tini, Rani mais aussi Ubay.

Enfin, je voudrais remercier l'ensemble des personnes du CESBIO avec lesquelles j'ai passé quatre années très enrichissantes.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	9
PARTIE 1 : LE RIZ	15
I - LE RIZ DANS LE MONDE	17
I -1 LES SYSTÈMES RIZICOLES	17
I -2 LES CONDITIONS DE CULTURE DU RIZ DANS LE MONDE	19
II - MORPHOLOGIE ET CYCLE DE CROISSANCE DU RIZ	22
II -1 LES ESPÈCES CULTIVÉES	22
II -2 LA CULTURE DU RIZ	23
II -2-1 Le semis	23
II -2-2 Phase végétative	24
II -2-3 Phase reproductive	25
III - CONCLUSION	26
PARTIE 2 : ETUDE METHODOLOGIQUE	29
I - ANALYSE EXPERIMENTALE	31
I -1 LES SYSTÈMES RADAR À SYNTHÈSE D'OUVERTURE (RSO) UTILISÉS	31
I -2 CADRE DES EXPÉRIENCES	34
I -3 LES SITES D'ÉTUDE	35
I -3-1 Jatisari - INDONESIE (Java)	36
I -3-2 Semarang - INDONESIE (Java)	37
I -3-3 Akita - JAPON (Honshu)	37
I -4 LES DONNÉES DE TERRAIN	38
I -4-1 Campagne de mesures	38
I -4-2 Analyse des données et résultats	42
I -5 LES DONNÉES RADAR	47
I -5-1 Acquisition des données radar	47
I -5-2 Etalonnage des images et extraction du coefficient de rétrodiffusion	52
I -5-3 Synthèse et analyse des données radar	55

II - INTERPRETATION PHYSIQUE	63
II -1 MODÉLISATION THÉORIQUE	63
II -1-1 Description du modèle MIT/CESBIO	64
II -1-2 Les paramètres du modèle	68
II -2 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET SIMULATIONS	69
II -2-1 Variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières	69
II -2-2 Effet de la longueur d'onde	72
II -2-3 Effet de la polarisation	74
II -2-4 Effet de l'angle d'incidence	76
III - CONCLUSION	78
PARTIE 3 : LES APPLICATIONS	81
I - ESTIMATION DES SURFACES RIZICOLES	83
I -1 ANALYSE DU PROBLÈME	83
I -2 MÉTHODOLOGIE	85
I -2-1 Mesure du changement temporel	85
I -2-2 Algorithme de cartographie des rizières	88
I -3 RÉSULTATS ET VALIDATION	95
I -3-1 Site de Semarang (ERS)	98
I -3-2 Site de Jatisari (RADARSAT)	100
I -4 TEST DE LA MÉTHODE SUR DES RIZIÈRES EN TERRASSES	101
I -5 DISCUSSION	101
II - SUIVI DE CROISSANCE DU RIZ	104
II -1 ANALYSE DU PROBLÈME	104
II -2 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS	105
II -2-1 Cas des données ERS : Carte des classes de hauteur	105
II -2-2 Cas des données RADARSAT : Carte des Golongans	109
II -3 DISCUSSION	112
III - PREVISION DES RENDEMENTS	114
III -1 ANALYSE DU PROBLÈME	114
III -2 CHOIX DU MODÈLE DE PRODUCTION	116
III -2-1 Les modèles de production de riz	116
III -2-2 Le modèle ORYZA 1	117

III -3 ETALONAGE DU MODÈLE	120
III -3-1 Pratiques culturales	121
III -3-2 Développement phénologique	121
III -3-3 Production journalière de matière sèche	122
III -4 ESTIMATION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE À PARTIR DES DONNÉES RADAR.	128
III -5 SIMULATION DE LA CROISSANCE DES PLANTES ET DU RENDEMENT DES CHAMPS DE RIZ, À PARTIR DES DONNÉES RADAR.	131
III -6 DISCUSSION	136
IV - ESTIMATION DE L'ÉMISSION DE METHANE	138
IV -1 CONTEXTE	138
IV -2 LES MÉCANISMES D'ÉMISSION DU MÉTHANE PAR LES RIZIÈRES INONDÉES	141
IV -3 LES FACTEURS INFLUENÇANT L'ÉMISSION DE MÉTHANE	142
IV -3-1 Le climat	143
IV -3-2 Les propriétés des sols	144
IV -3-3 Les pratiques culturales	145
IV -4 RELATION ENTRE LA CROISSANCE DE LA PLANTE ET L'ÉMISSION DE MÉTHANE	146
IV -5 LES MODÈLES D'ESTIMATION D'ÉMISSION DE MÉTHANE	148
IV -6 APPORT DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION	151
V - CONCLUSION	153
<u>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	<u>155</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>161</u>
<u>TABLE DES ILLUSTRATIONS</u>	<u>169</u>
I -LISTE DES FIGURES	169
II -LISTE DES TABLEAUX	174

Introduction

Depuis 1989, la production de riz dans la monde a atteint des valeurs records. Avec une production mondiale de 520 millions de tonnes de paddy (riz alimentaire) en 1993, le riz représente 15% de la surface cultivée mondiale (Mendez del Villar, 1994) et occupe désormais la seconde place des trois principales céréales (blé, riz, maïs) produites dans le monde. En effet, durant les vingt dernières années, les surfaces plantées en riz, et surtout les rendements, n'ont pas cessé de progresser et la production totale a plus que triplé. En Asie, où a lieu la quasi-totalité de la production mondiale, le riz est la principale source d'alimentation, représentant 35% à 80% de l'apport calorique journalier (IRRI, 1993).

En terme de production de riz, la tendance actuelle vise à améliorer la productivité des rizières par l'utilisation accrue de fertilisants, par l'augmentation de la mécanisation, mais surtout par l'utilisation de variétés modernes à fort rendement avec un cycle de croissance raccourci à moins de 3 mois. On observe ainsi une augmentation du nombre de récoltes par an : de une à deux, de deux à trois, avec un maximum de quatre récoltes annuelles enregistrées au Viêt-nam. Cependant, alors que la productivité augmente, de grandes fluctuations peuvent être observées d'une année sur l'autre. Les sécheresses périodiques, les pluies irrégulières et les inondations lors des périodes de mousson, ont causé de sérieux dommages aux cultures de paddy durant les dernières décennies, entraînant de très fortes variations du prix du riz. L'instabilité de la demande asiatique demeure donc très présente, en particulier dans des pays comme l'Indonésie, les Philippines ou le Japon, où les variations de la production nationale peuvent atteindre 20%.

La majeure partie des surfaces cultivées en riz dans le monde sont des rizières irriguées ou inondées. Ces rizières, qui permettent d'obtenir les meilleurs rendements et produisent la quasi totalité de la production mondiale, sont également une des principales sources d'émission de méthane atmosphérique, en raison de la présence quasi-permanente d'eau sous la culture, durant la majeure partie de leur cycle de croissance.

Or, le méthane est par son importance, le deuxième gaz à effet de serre après le CO₂ (Rhode, 1990), et les concentrations atmosphériques ont plus que doublé durant les 200 dernières années. Des estimations récentes d'émission de méthane par les champs de riz (IRRI, 1993) varient entre 20 et 100 Mt/an, soit 17% environ de l'émission totale de méthane issue de l'activité humaine, avec un taux de croissance d'environ 0,5 à 1% par an (Steele et al., 1992). Les émissions de méthane par les rizières sont affectées par le climat, le régime hydrique, les propriétés des sols et des diverses pratiques culturales telles que l'irrigation, le drainage ou la fertilisation. Selon l'IRRI (1993), la production mondiale annuelle de riz paddy devra augmenter de presque 70% durant les 35 prochaines années pour satisfaire l'augmentation des besoins alimentaires induits par la croissance de la population. Ainsi, les rizières irriguées, qui assurent les meilleurs rendements devront inévitablement se développer. Avec l'augmentation des surfaces rizicoles irriguées les émissions de méthane devraient encore progresser si les techniques culturales actuelles ne changent pas (Minami & Neue, 1994).

Des méthodes d'estimation et de suivi des surfaces de riz irriguées ou inondées sont donc particulièrement nécessaires. Or, en matière de recherche rizicole, ces méthodes d'évaluation et de suivi des surfaces ont reçu beaucoup moins d'attention que les méthodes d'amélioration de la production. Les méthodes traditionnelles basées sur l'échantillonnage d'un faible nombre de champs sont encore largement utilisées. Il en résulte, même si celles-ci changent peu, une très mauvaise connaissance des surfaces cultivées. De plus les pratiques culturales évoluent et certaines informations telles que le nombre de cultures par an ou le rendement final sont nécessaires pour estimer la production.

C'est pourquoi des systèmes précoces et précis de suivi des surfaces rizicoles et d'estimation de la production sont nécessaires pour permettre :

- de mieux organiser la production de façon à satisfaire, d'une part les besoins alimentaires des populations locales, et d'autre part, à assurer des exportations rentables sur le marché international.
- de déterminer la production de biomasse du riz durant le cycle de croissance de la culture, afin de d'évaluer la quantité de méthane émise par les rizières.

Depuis plusieurs années, les données de télédétection font l'objet de nombreuses études pour un suivi des zones cultivées, car elles permettent une couverture plus exhaustive que les méthodes traditionnelles d'échantillonnage. Les résultats du programme MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) ont montré l'utilité des données des satellites optiques pour le suivi des cultures. Plusieurs méthodes de cartographie des rizières ont été

développées à l'aide des données optiques mais restent limitées à des sites spécifiques (Le Toan, 1977 ; Malingreau, 1986a ; Okamoto et Fukhura, 1996 ; Turner et Congalton, 1998). De plus, la culture du riz étant principalement produite en milieu tropical, la forte couverture nuageuse présente dans ces régions risque de limiter l'acquisition des données optiques. Gastellu-Etchegorry (1988) estime par exemple entre 8 et 20% pour SPOT et 2 et 10% pour LANDSAT, la probabilité d'obtenir, en Indonésie, au moins une image par mois présentant une couverture nuageuse inférieure à 10%. Dans ce contexte, les données satellites radar présentent donc un outil particulièrement intéressant pour la cartographie des rizières mais surtout pour le suivi de croissance du riz, qui nécessitent plusieurs acquisitions d'images satellites durant un même cycle.

Depuis le lancement du satellite européen ERS-1, plusieurs projets pilotes entrepris dans différentes parties du monde - par exemple en Inde (Mohan et al., 1992), au Japon (Kurosu et al., 1995) ou en Thaïlande (Aschbacher et al., 1995) - ont montré l'utilité des données radar pour la détection des surfaces rizicoles. Des travaux ont également été menés à l'aide du satellite JERS-1 (Rosenqvist et Oguma, 1995) ou du plus récent satellite RADARSAT (Yun et al., 1997). Ces travaux ont souligné le besoin d'études supplémentaires pour évaluer les possibilités des données radar pour le suivi opérationnel du riz dans différentes régions ayant des pratiques culturelles spécifiques. La compréhension de la rétrodiffusion radar des champs de riz, en fonction de la croissance de la plante, est nécessaire pour le développement de méthodes sûres et robustes pour la cartographie, le suivi et l'estimation de la production des rizières. Pour cela, la diversité des conditions de cultures du riz, due à plusieurs facteurs tels que la variété, les conditions climatiques ou les pratiques culturelles doit être prise en compte.

L'objectif de ces travaux est d'analyser les résultats expérimentaux obtenus sur divers sites géographiques et d'interpréter les observations par un modèle théorique de rétrodiffusion des rizières. Les résultats de cette analyse seront utilisés pour dériver des méthodes de suivi robustes, adaptées aux caractéristiques des rizières. Ces méthodes comprennent l'estimation des surfaces rizicoles, le suivi de la croissance du riz pour déterminer le nombre de récoltes par an effectuées sur un champ et l'estimation des rendements. Un travail prospectif, concernant l'estimation de l'émission de méthane par les champs de riz sera finalement abordé.

La présentation des travaux se déroule en 3 phases : tout d'abord, la description des caractéristiques de la culture du riz, suivie d'une étude méthodologique comprenant l'analyse et l'interprétation physique des données satellites radar en fonction des paramètres des plantes de riz mesurés sur le terrain. Enfin, la troisième phase consiste à développer des méthodes robustes de cartographie, de suivi de croissance (afin de déterminer le nombre de cultures par an), de prévision des rendements ainsi que d'aide à l'estimation de l'émission de méthane par les rizières.

Ces investigations seront menées à l'aide de plusieurs capteurs tels que ERS, RADARSAT, ou JERS, et ont pour objectif d'être applicables aux données des futurs capteurs RADARSAT-2/3 et ASAR sur ENVISAT.

LE RIZ

I - LE RIZ DANS LE MONDE

I - 1 Les systèmes rizicoles

I - 2 Les conditions de culture du riz dans le monde

II - MORPHOLOGIE ET CYCLE DE CROISSANCE DU RIZ

II - 1 Les espèces cultivées

II - 2 La culture du riz

III - CONCLUSION

I - LE RIZ DANS LE MONDE

Une étude des conditions de culture du riz dans le monde nous paraît importante pour bien connaître les caractéristiques des systèmes rizicoles, afin de déterminer les besoins et critères auxquels devront répondre les méthodes de cartographie et de suivi des rizières.

I-1 Les systèmes rizicoles

Il existe plusieurs types de rizicultures selon leur alimentation hydrique (IRRI, 1993):

1- La riziculture pluviale, pour laquelle la culture est alimentée en eau par les pluies ainsi parfois, que par la nappe phréatique. Elle est pratiquée sur terres en pente plus ou moins forte (riz de montagne ou de plateau) ou sur terres de bas de pente. Ce système, encore dominant en Afrique et Amérique Latine, est aussi présent en Asie. Cette riziculture représente 12% de la surface, mais seulement 4% de la production mondiale (Figure 1). Les rendements en riziculture pluviale sont très faibles, d'environ 1 t/ha, bien que dans certaines régions partiellement mécanisées d'Amérique Latine ils peuvent atteindre 2 à 3 t/ha.

2- La riziculture inondée, pour laquelle le riz est cultivé dans une zone basse inondée pendant une partie du cycle cultural. Ce système est caractérisé par un manque de contrôle de l'alimentation hydrique. Des périodes d'inondation et de sécheresse peuvent donc

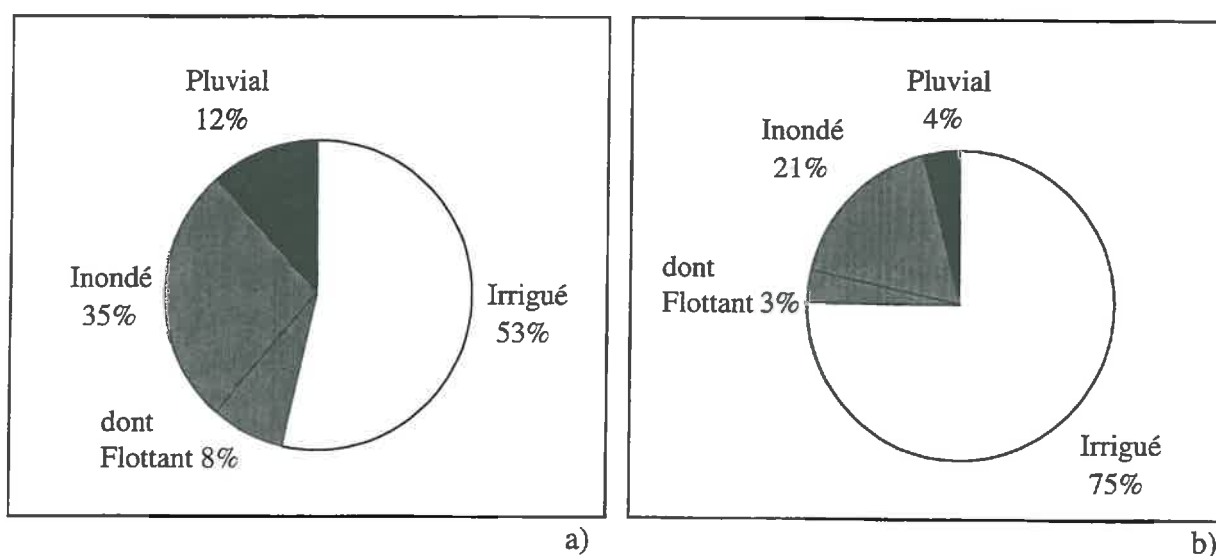


Figure 1 : Répartition des différents écosystèmes rizicoles dans le monde
a) par surface, b) par production (source : IRRI, 1993)

être problématiques. La riziculture inondée représente 35% de la surface mais seulement 18% de la production mondiale avec des rendements qui restent faibles (Figure 1) : 1 à 2 t/ha en culture traditionnelle jusqu'à 3 à 4 t/ha en culture améliorée. La riziculture flottante est un cas particulier où la hauteur de la lame d'eau peut aller de 1,5 à 5m. Cette dernière représente 10 millions d'hectares (8%) avec des rendements d'environ 1,5 t/ha.

3- La riziculture irriguée, qui implique une maîtrise de l'eau (irrigation et drainage). Deux cas de riziculture irriguée sont à différencier : la riziculture irriguée de saison humide, où l'irrigation vient en complément des pluies, et la riziculture irriguée de saison sèche, où l'irrigation assure la quasi-totalité de l'alimentation hydrique de la plante. La riziculture irriguée représente 53% de la surface (Figure 1) mais produit plus de 75% du riz mondial, avec des rendements allant de 3 à 9 t/ha. Les deux autres systèmes sont essentiellement voués à la consommation personnelle. Les rizières de l'Est asiatique, qui représentent 40% de la surface mondiale sont irriguées à 93%. Des progrès significatifs ont été réalisés dans les écosystèmes irrigués, permettant de développer des variétés à très forts rendements pouvant atteindre 11 t/ha par récolte, avec un cycle de croissance raccourci (100 jours) et une meilleure stabilité du rendement (résistance aux maladies, à la sécheresse, à la verse, à l'égrenage).

La majorité des surfaces rizicoles du monde est donc soit inondée, soit irriguée, c'est-à-dire, recouverte d'une lame d'eau plus ou moins épaisse durant la majeure partie de leur cycle de croissance. Le riz est en effet une des rares céréales pouvant s'adapter à de telles conditions (sols inondés, peu fertiles) car il possède un système efficace de circulation de l'air de la partie aérienne de la plante aux racines (Swaminathan, 1984).

En terme d'observation par satellite, cette couche d'eau, omniprésente sous la culture, va influencer le signal, que ce soit dans le domaine optique ou micro-onde. D'autre part, les cycles de croissance réduits, présentent une contrainte sur l'acquisition d'images durant un cycle de croissance.

I-2 Les conditions de culture du riz dans le monde

On peut observer une grande variété d'écosystèmes rizicoles. On trouve ainsi des rizières sous des latitudes variant de 53°N (Chine) à 40°S (Argentine), cultivées en haute altitude (Népal, Inde) ou dans les déserts du Pakistan, de l'Iran ou de l'Égypte. On les trouve également sur sol sec dans certaines parties d'Asie, d'Afrique et d'Amérique Latine, ou encore sous forme de cultures inondées dans plusieurs régions d'Asie du Sud Est.

La FAO (Food and Agriculture Organisation) a regroupé les zones de production du riz en zones agro-écologiques, selon les conditions climatiques. De manière simplifiée, le système de classification considère, selon la température corrigée au niveau de la mer, les régions suivantes:

- Tropiques : Régions où la température moyenne mensuelle $\langle T_{\text{mois}} \rangle$ est supérieure à 18°C pour tous les mois de l'année.
- Sub-tropiques : $\langle T_{\text{mois}} \rangle$ inférieure à 18°C pour un ou plusieurs mois de l'année.
- Tempérées : $\langle T_{\text{mois}} \rangle$ inférieure à 5°C pour un ou plusieurs mois de l'année.

Ces classes sont ensuite divisées en sous-classes selon la durée durant laquelle le riz peut se développer (LGP : Length of the Growing Period), qui correspond au nombre de jours durant l'année où la disponibilité en eau des sols (issue des précipitations) est supérieure au double de l'évaporation potentielle :

- Aride : LGP inférieure à 75 jours
- Semi-aride : LGP comprise entre 75 et 180 jours
- Sub-humide : LGP comprise entre 180 et 270 jours
- Humide : LGP supérieure à 270 jours

La Figure 2 présente la répartition des zones agro-écologiques en Asie du Sud-Est. La pression de la population sur les terres arables est la plus forte dans les sub-tropiques humides et sub-humides telle que la Birmanie et dans les tropiques humides (Indonésie, Malaisie). Ces zones agro-écologiques ont des conditions de croissance très favorables et présentent les potentiels de production les plus élevés, contrairement aux tropiques semi-arides (Inde) où le potentiel de production est le plus faible. Le riz est la culture alimentaire dominante dans les sub-tropiques humides (78% de la surface en céréales) et dans les tropiques humides (74%) et sub-humides (70%). Elle reste une culture importante dans les régions de transition comme les sub-tropiques sub-humides (30%) (Sud de la Chine) et dans les tropiques semi-arides (20%). Par

contre, elle représente moins de 10% des surfaces cultivées dans les sub-tropiques semi-arides (certaines régions de la Chine) et dans les régions tempérées.

Ainsi, selon les régions, l'importance des surfaces cultivées est très variable. De même, selon les conditions climatiques, le riz pourra être cultivé une seule fois par an (régions arides ou semi-arides) ou durant quasiment toute l'année (régions humides). Dans ces régions, comme il n'y a pas de contrainte climatique forte, plusieurs récoltes par an pourront être réalisées, et les champs pourront être semés à tout moment de l'année.

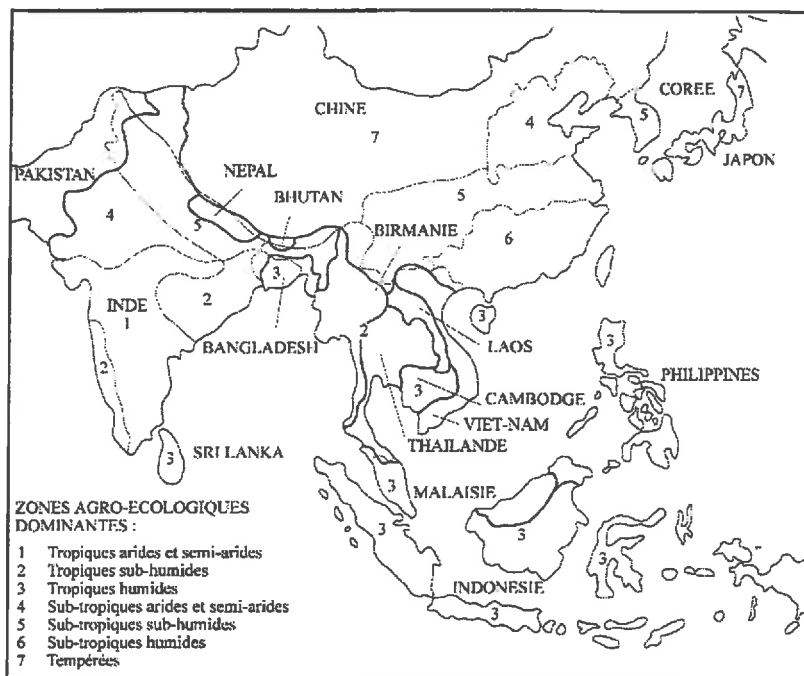


Figure 2 : Répartition des zones agro-écologiques en Asie du Sud-Est (d'après IRRI, 1993)

Les agrosystèmes rizicoles irrigués sont concentrés principalement dans les sub-tropiques humides et sub-humides et dans les tropiques humides. La surface de ces écosystèmes diminue progressivement au profit de l'urbanisation et de l'industrialisation et les rendements approchent ceux obtenus dans les conditions optimales en stations expérimentales. Ils sont caractérisés par une pratique des cultures intensives avec un fort apport de fertilisants. Les écosystèmes peu favorables dominent dans les sub-tropiques sub-humides (Est de l'Inde, Birmanie, Thaïlande) et dans de grandes parties des tropiques humides (Bangladesh, Cambodge, Laos). Ce sont des régions où les technologies modernes en matière de pratiques culturales peuvent avoir un impact très important. Dans ces régions, jusqu'à présent, la croissance de la production s'est faite principalement par l'intermédiaire d'une extension des surfaces rizicoles.

Ainsi, il existe de grandes différences au niveau des pratiques culturales. Les méthodes de culture du riz varient des systèmes hautement mécanisés aux Etats-Unis à des systèmes traditionnels peu mécanisés dans plusieurs parties d'Asie du Sud Est. Les rendements moyens peuvent varier énormément selon les pays, de moins de 1 t/ha dans les pays d'Afrique à plus de 7 t/ha en Australie, Japon, Corée du Sud et Etats-Unis (Swaminathan, 1984).

Caractéristiques	Système traditionnel	Système de transition, manuel	Système de transition, mécanisé	Système moderne, manuel ^m ou mécanisé ^M
Surface des rizières (ha)	1,5	0,1-3	1-10	0,1-2
Durée du cycle de croissance (jours)	150-250	110-150	110-150	80-120
Gestion de l'eau	Faible	Modérée	Modérée	Forte
Méthode plantation*	S/T	S/T	S/T	T
Traitement chimique	Aucun	Aucun	Modéré	Modéré ^m à élevé ^M
Préparation du sol**	H/A	H/A	C/T	A ^m /C ^M /T ^M
Production (tonnes/ha)	1,5	2,5+	2,5+	4,0+
Utilisation	Subsistance	Commercial	Commercial	Commercial
Localisation	Basse Birmanie, Thaïlande (Nord-Est), Bangladesh, Inde (Est)	Sri Lanka, Java, Chine, Nord Viêt-nam, Thaïlande (Sud)	Thaïlande (Centre), Malaisie (Ouest), Sud Viêt-nam	Sud Viêt-nam, Chine, Taiwan, Corée du Sud, Japon

* S = Semis direct ; T = Repiquage, ** H = Manuelle, A = Animal de labour, C = Charrue, T = Tracteur

Tableau 1 : Principaux systèmes rizicoles utilisés en Asie (source : Barker et al., 1985).

Le Tableau 1 décrit les caractéristiques de la production de riz irrigué ou inondé des principaux pays d'Asie (Barker et al., 1985). Ils sont différenciés par les méthodes de production plutôt que par la taille des rizières. En effet, les systèmes les plus intensifs sont limités à des surfaces peu étendues et s'appliquent à des champs de petite taille, par exemple au Sud et au Nord Viêt-nam, au Japon ou en Corée où des propriétés de moins de 1 ha sont répandues. Les systèmes traditionnels, par exemple dans la plupart des régions de Thaïlande, ont des tailles de champs bien plus importantes (jusqu'à 4 ha). La tendance actuelle évolue vers des techniques de production intensives mais peu mécanisées. Selon les conditions socio-économiques, les techniques culturales comprennent le repiquage (manuel ou mécanique) et le semis direct (à la volée ou en ligne). D'autre part, les récoltes peuvent être manuelles ou mécanisées.

Les pratiques culturales varient donc de façon importante selon les régions. Un système d'observation par satellite, adapté à ces disparités dans les pratiques culturales sera donc nécessaire. Il devra prendre en compte ces différentes caractéristiques telles que la taille des champs, les dates de semis, les méthodes de semis et récolte, ou la durée de croissance.

II - MORPHOLOGIE ET CYCLE DE CROISSANCE DU RIZ

Une connaissance de la morphologie de la plante de riz et surtout des différentes étapes de sa croissance, nous paraît importante pour mieux comprendre les particularités de son développement et les paramètres qui vont affecter la réponse radar.

II -1 Les espèces cultivées

Il existe deux espèces principales de riz cultivées dans le monde (Swaminathan, 1984) : *Oryza sativa*, originaire de l'Inde et de la Chine, la plus largement répandue et *Oryza glaberrima*, originaire d'Afrique qui est encore présente dans certains pays d'Afrique et d'Amérique Latine mais qui n'a jamais atteint l'importance économique de la précédente.

Les principaux groupes génétiques dérivés d'*Oryza sativa* sont (Williams, 1975) :

- *indica*, variétés de culture aquatique tropicale, à tallage fort, à feuilles fines, à tiges de grande taille et à grains le plus souvent longs et minces. On les trouve dans les régions humides des tropiques et sub-tropiques. Ce sont des variétés à faible rendement qui réagissent peu à la fumure azotée mais sont très résistantes aux inondations et aux conditions de sols peu fertiles.
- *japonica*, variétés à fort rendement et paille courte, très sensibles à la fertilisation azotée mais nécessitant une maîtrise des conditions culturales, avec deux principaux sous-groupes morphologiques :
 - *japonica* tempéré : variété de culture irriguée dans le nord de la Chine, en Corée, au Japon, dans le bassin méditerranéen. Tallage moyen, feuilles fines, grains le plus souvent courts et arrondis.
 - *japonica* tropical : variétés de culture pluviale mais aussi quelques variétés d'Asie. Tallage faible, feuilles larges, grains en général longs et larges.
- Des cultivars nouveaux ont été créés par hybridation ou mutagenèse dans le but d'améliorer certaines caractéristiques de la plante afin, notamment, d'augmenter son rendement et de faciliter sa culture et récolte (IRRI, 1993).

II -2 La culture du riz

II -2-1 Le semis

En matière de techniques culturales, on distingue, selon le mode de semis, 2 types de cultures :

- Le semis direct : les grains germés sont semés à la volée ou en ligne à forte densité. Le semis se fait généralement à sec, puis on submerge immédiatement après sous 2 à 5 cm d'eau. La hauteur d'eau est maintenue jusqu'à ce que les plants mesurent 15 à 20 cm.
- Le semis en pépinière suivi d'un repiquage : les grains germés sont semés en pépinière à très forte densité, sous 2 à 6 cm d'eau. Entre 20 et 30 jours après, les plants sont repiqués par touffes de 1 à 10 plants et disposés en ligne à raison de 10 à 20 touffes au m². En raison des traumatismes subits par la plante lors de l'arrachage et du repiquage, la reprise demande entre 4 et 15 jours. Le repiquage se fait de préférence dans de la boue fluide avec une tolérance de 3 à 5 cm d'eau. Dès la reprise, une hauteur d'eau égale à celle du tiers de la taille des plants est maintenue pour freiner le développement de la végétation adventice.

Du semis à la récolte, le riz accomplit deux phases de croissance distinctes : la phase végétative et la phase reproductive. La phase végétative s'étend de la germination à l'initiation florale. Elle se caractérise par une émission importante de talles, une augmentation de la hauteur de la plante et le développement de feuilles à des intervalles réguliers. La phase reproductive comprend quant à elle les stades phénologiques épiaison/floraison (diminution du nombre de talles, développement de la feuille paniculaire, formation et floraison des panicules). Elle se termine par la maturation (mûrissement des grains et assèchement de la plante) (Figure 3).

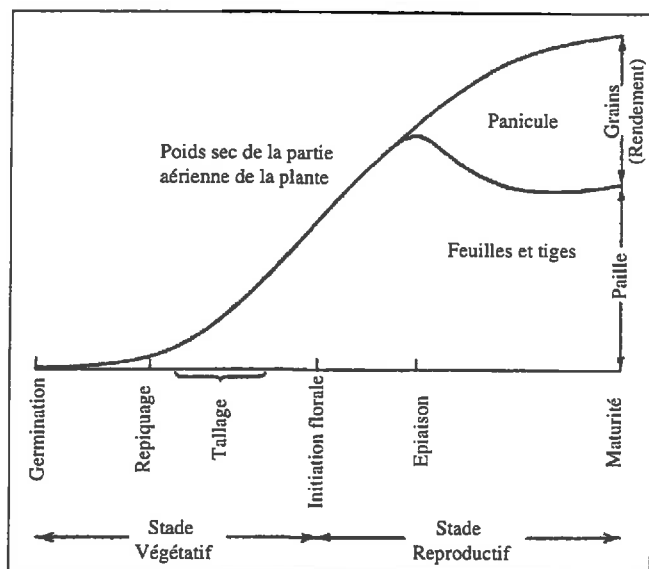


Figure 3 : Evolution de la biomasse sèche du riz selon les différents cycles de croissance (d'après Murata et Matsuhima, 1975)

Les variétés diffèrent entre elles par la durée de leur cycle végétatif, ce qui permet de les classer en variétés hâtives, intermédiaires et tardives. Cependant, le cycle végétatif pour une même variété peut être profondément modifié par les conditions climatiques et les façons culturales (Vergara, 1980). Le cycle reproductif reste relativement constant quelle que soit la variété considérée (Figure 4). Ainsi, pour une variété accomplissant son cycle en 120 jours, en milieu tropical, la phase végétative durera 60 jours, la phase reproductrice 30 jours suivie de 30 jours pour la maturation.

II-2-2 Phase végétative

- La germination : la première ébauche de la tige au moment de la germination est la tigelle qui est cylindrique. La première feuille, également cylindrique et verticale, apparaît ensuite. Le développement d'un plant de riz, entre le début de la germination et la phase de tallage, suit, pour des mêmes conditions de milieu, une croissance très régulière en poids et en taille (Figure 3).

- Le tallage et la croissance : c'est la période de croissance où le riz a la possibilité d'émettre des tiges secondaires et tertiaires donnant naissance à autant de panicules. Le tallage commence une quinzaine de jours après le semis et se poursuit jusqu'à la floraison. Au moment du repiquage, la tige primaire disparaît presque totalement. L'émission de nouvelles talles, lente au début, devient de plus en plus rapide. Environ 50 à 60 jours après le repiquage, les touffes couvrent totalement les espaces entre plantes. C'est le stade « plateau de tallage ». L'importance du tallage est fonction de la variété, de la richesse du sol, de la température, de l'éclairement et de la densité de semis. Les feuilles sont produites à partir de la tige principale à raison d'une par semaine. L'intervalle de production des feuilles est plus court aux jeunes stades (4 à 5 jours) et plus long ensuite (8 à 9 jours). Leur durée de vie dépend de leur position sur la tige principale, les plus hautes vivant plus longtemps que les plus basses (Vergara, 1980). De la germination à l'épiaison, la structure de la plante reste verticale.

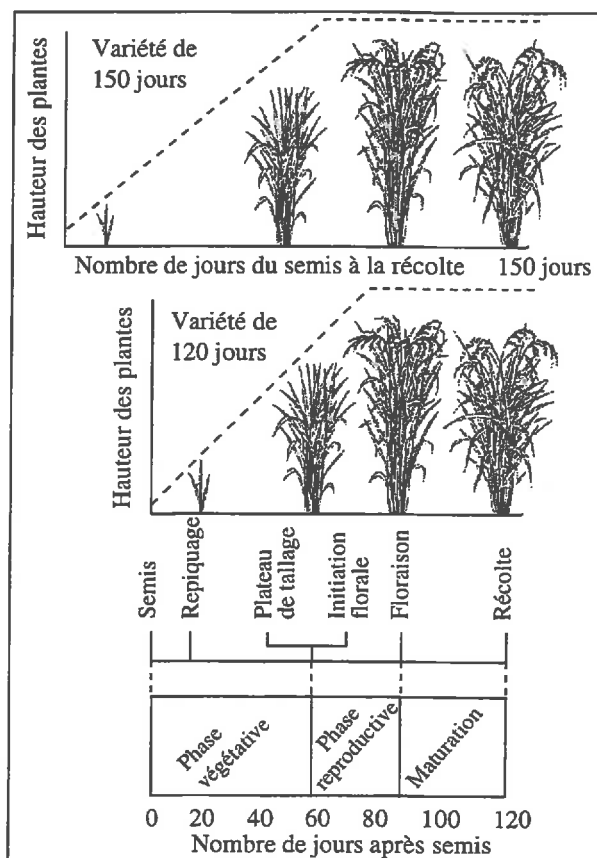


Figure 4 : Comparaison des stades de croissance d'une variété hâtive (120 jours) et d'une variété tardive (150 jours) en milieu tropical (d'après Vergara, 1980)

II -2-3 Phase reproductive

- **Epiaison - floraison** : l'ébauche de l'épi apparaît avant la fin du tallage. La dernière feuille avant la panicule, appelée feuille paniculaire, est caractérisée par son angle d'insertion sur la tige. Cet angle varie avec les variétés et rend les panicules plus ou moins apparentes sur le champ. La floraison terminée, les feuilles paniculaires s'abaissent, laissant émerger les panicules (Figure 5). La formation complète de la panicule pour toutes les plantes d'une même culture s'étend sur environ 10 à 14 jours. De même, 7 à 10 jours sont nécessaires pour la floraison complète d'une panicule (Figure 6). Après la floraison, la croissance de toutes les parties végétatives cesse et la plupart de l'assimilat net est destiné aux organes reproductifs (Murata et Matsushima, 1975). La plante perd son aspect vertical.

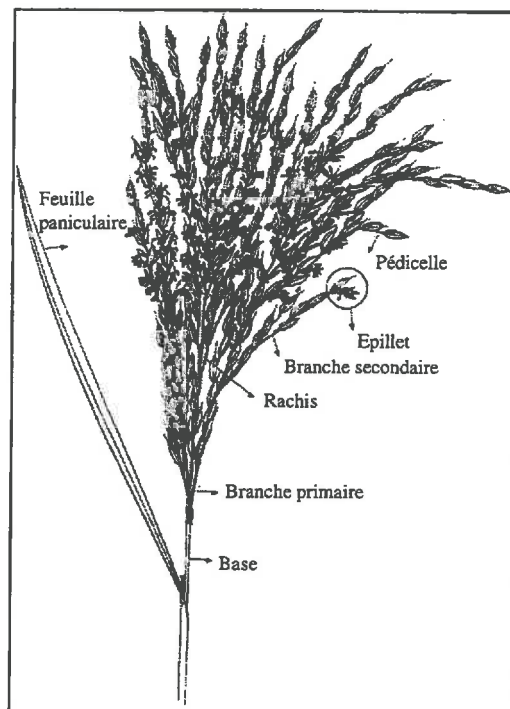


Figure 5 : La panicule (IRRI, 1993)



Figure 6 : Stade floraison
(source : IRRI, 1993)

- **Le grossissement des grains et la maturation** : le grossissement des grains est une phase d'intense activité de la photosynthèse. Comme il n'y a plus de croissance des tiges, la matière sèche synthétisée dans les feuilles est entièrement destinée à l'accumulation des réserves (Figure 3). Les feuilles et les tiges commencent à jaunir. Durant la maturation, les dernières réserves des feuilles et des tiges jaunissantes migrent vers les grains, où est accumulé l'amidon. Puis, les grains s'assèchent et leur texture suit successivement 3 états : laiteux, pâteux et dur. Ce cycle s'étend sur environ 30 à 40 jours. Durant cette phase, la structure de la plante reste stable mais sa teneur en eau diminue. La récolte peut avoir lieu dès lors que 90% des grains sont complètement mûrs.

III - CONCLUSION

Le riz est une culture que l'on peut trouver dans des environnements très variés. Il peut être cultivé de manière intensive et très mécanisée ou au contraire de manière extensive et à fort taux de main d'œuvre. Ainsi, les rizières peuvent présenter des caractéristiques très variées. Les méthodes de cartographie et de suivi qui seront développées devront donc être suffisamment robustes pour prendre en compte toutes ces disparités.

Les caractéristiques qui sont importantes et qui compliquent l'utilisation des données satellites sont les suivantes :

- La taille des champs, qui peut varier de moins de 1 ha à plus de 4 ha,
- La durée du cycle de croissance des plantes qui peut aller de 100 jours à plus de 150 jours,
- Les méthodes de plantation (semis direct ou repiquage) qui affectent l'état du sol au début de la culture, ainsi que la durée de la phase végétative,
- Le nombre de cycles par an sur un même champ qui peut varier de 1 à 4,
- Des cultures à des stades de développement divers dans une même région.

D'autre part, l'analyse de la morphologie et de la croissance du riz a permis d'observer certains éléments qui seront importants pour la compréhension de la réponse radar des rizières :

- La plante croît très rapidement durant le stade végétatif, puis sa croissance cesse et seuls les organes reproductifs se développent durant la phase reproductive,
- Durant la majeure partie du cycle, le sol est recouvert d'une lame d'eau de 5 à 10 cm,
- D'abord très verticale, la plante s'ouvre peu à peu durant le cycle de croissance pour atteindre des angles d'inclinaison de feuilles pouvant atteindre 45° en fin de cycle.

Une étude de la variation de la réponse radar des différents capteurs, en fonction des paramètres de la plante, mesurés sur les champs de riz des sites tests, est maintenant nécessaire pour :

- *définir les phénomènes physiques qui vont être responsables de la réponse radar des rizières,*
- *déterminer quels sont les capteurs adaptés aux caractéristiques des rizières.*

L'objectif final est de mettre au point des méthodes robustes de cartographie, de suivi et d'estimation des rendements du riz.

ETUDE METHODOLOGIQUE

I - ANALYSE EXPERIMENTALE

- I - 1 Les systèmes radar à synthèse d'ouverture (RSO) utilisés
- I - 2 Cadre des expériences
- I - 3 Les sites d'étude
- I - 4 Les données de terrain
- I - 5 Les données radar

II - INTERPRETATION PHYSIQUE

- II - 1 Modélisation théorique
- II - 2 Interprétation des résultats expérimentaux et simulations

III – CONCLUSION

I - ANALYSE EXPERIMENTALE

Pour bien comprendre les signatures micro-ondes des rizières, une première analyse expérimentale des données des satellites radar, en fonction des caractéristiques morphologiques de la plante, est nécessaire. Ainsi, il nous sera possible de développer des méthodologies adaptées et robustes.

I-1 Les systèmes radar à synthèse d'ouverture (RSO) utilisés

Les systèmes radar imageurs ont pour principe de base d'envoyer à travers une antenne, un rayonnement électromagnétique vers la surface terrestre, puis de mesurer les caractéristiques du rayonnement retourné (Figure 7). L'onde électromagnétique est caractérisée par sa direction de propagation, son amplitude et phase, sa longueur ainsi que sa polarisation. Il existe actuellement plusieurs systèmes radar imageurs qui permettent d'acquérir des données de manière régulière. Ces systèmes radar présentent des configurations différentes en terme de longueur d'onde λ (ou de fréquence f), de polarisation p et d'incidence θ de l'onde incidente.

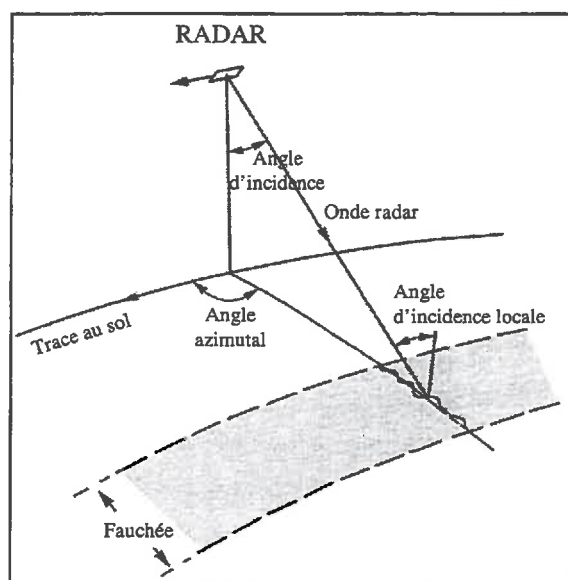


Figure 7 : Principe du radar imageur

La Figure 8 donne un aperçu du spectre électromagnétique généralement utilisé dans le domaine des micro-ondes. Il s'étend de 0,3 GHz à 100 GHz mais les radars imageurs les plus utilisés pour l'observation de la terre, par avion ou satellite, opèrent dans les fréquences suivantes : 9,4 GHz (bande X), 5,3 GHz (bande C), 1,25 GHz (bande L) ou 0,5 GHz (bande P).

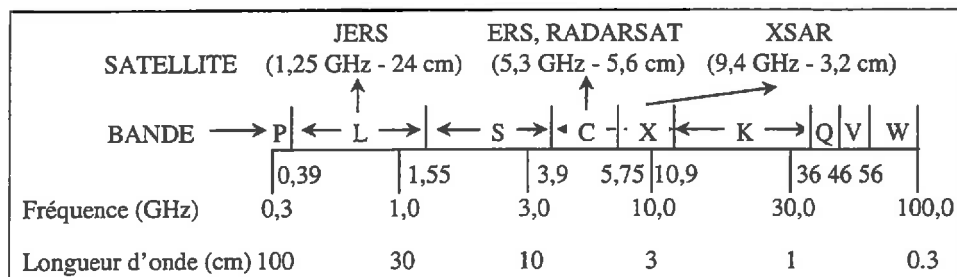


Figure 8 : Domaine spectral des hyperfréquences et désignation des fréquences radar

La polarisation de l'onde électromagnétique est la direction du vecteur champ électrique \vec{E} . Cette direction est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. En observation de la terre, la surface observée est assimilée abusivement à un plan horizontal. Le plan

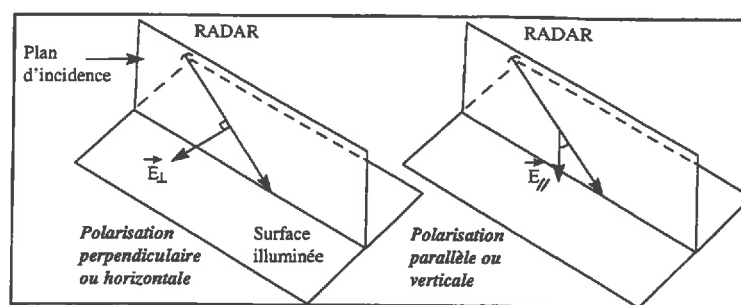


Figure 9 : Représentation des polarisations incidentes horizontale et verticale.

d'incidence, défini comme le plan perpendiculaire à la surface observée, correspond donc à un plan vertical. Lorsque la direction de \vec{E} est perpendiculaire au plan d'incidence, on parle de polarisation horizontale (notée H), et lorsqu'elle est parallèle au plan d'incidence on parle de polarisation verticale (notée V). (Figure 9). Les systèmes imageurs présentent différentes configurations de polarisation. Les plus utilisées sont les configurations de polarisation linéaire : HH, VV, HV, ou VH, le premier terme correspondant à la polarisation à l'émission de l'onde et le deuxième terme à la réception de l'onde.

Enfin, l'angle d'incidence est l'angle entre la direction de l'onde électromagnétique incidente et la normale à la surface de la terre (Figure 7). On utilise généralement l'angle d'incidence locale qui tient compte de la pente locale du terrain par rapport à la direction de l'onde radar. Il se définit comme l'angle mesuré entre le faisceau radar et la normale à la pente au point d'incidence.

Le Tableau 2 présente les caractéristiques des capteurs spatiaux les plus récents ainsi que ceux des capteurs futurs.

	ERS-1 et ERS-2	JERS-1	RADARSAT, RADARSAT-2	ENVISAT
Fréquence	Bande C	Bande L	Bande C	Bande C
Polarisation	VV	HH	HH	HH/VV ou VV/VH ou HH/HV
Résolution spatiale	25 m	25 m	25 - 100 m	25 m, 150 à 1000 m
Angle d'incidence	23°	35°	20-50°	15-45°
Répétitivité temporelle	35 jours	44 jours	24 jours	35 jours
Lancement	1991&1995	1992	1995 & 2001	2000
Durée de vie	> 7 ans	6 ans*	> 5 ans	> 5 ans

* Fin d'acquisition des données au mois d'Octobre 1998

Tableau 2 : Caractéristiques des principaux capteurs radar

En 1991, le radar imageur européen ERS-1 a été mis sur orbite, suivi en 1995 par ERS-2. Tous les deux opèrent en bande C (5,3 GHz), polarisation VV et avec un angle d'incidence de 23° au centre des 100 km de fauchée. La résolution spatiale est de l'ordre de 25 m. Les capteurs ERS ont une répétitivité temporelle de 35 jours si l'on considère une même orbite ascendante ou descendante. Ces capteurs ont été conçus au départ pour l'observation des océans mais ont fait l'objet, depuis leur lancement, de nombreuses applications dans le domaine de l'observation de la biosphère continentale.

Le capteur japonais JERS-1, lancé en 1992, permet d'acquérir des pixels en bande L (1,25 GHz), polarisation HH, avec un angle d'incidence de 35°. La résolution spatiale est de l'ordre de 25 m. JERS permet d'acquérir des images tous les 44 jours, avec une largeur de fauchée de 100 km.

Le capteur canadien RADARSAT a été lancé en 1995. Il permet d'obtenir des images tous les 24 jours, sous plusieurs angles d'incidences (de 20 à 49° selon le mode), et, contrairement aux capteurs ERS et JERS, à plusieurs résolutions (de 9 à 100 m). Il opère en bande C (5,3 GHz) et en polarisation HH. Le mode Standard correspond à une résolution de 25 m dans la direction de visée et de 28 m dans la direction azimutale avec une largeur de fauchée de 100 km. Ce mode peut se découper en 7 sous-modes selon l'angle de l'onde incidente, notés S1 ($\theta=20$ à 27°), S2 ($\theta=24$ à 31°), S3 ($\theta=30$ à 37°), S4 ($\theta=34$ à 40°), S5 ($\theta=36$ à 42°), S6 ($\theta=41$ à 46°), S7 ($\theta=45$ à 49°). Le mode fine résolution appelé mode Fin permet d'acquérir des images avec une résolution de 9 à 11 m dans la direction de visée et de 11 m dans

Mode	Largeur de fauchée (km)	Résolution (R* x Az*) (m)	Angle d'incidence
Standard	100	25 x 28	20 - 49
Fauchée large			
(1)	165	48-30 x 28	20-31
(2)	150	32-25 x 28	31-39
Fine résolution	45	11-9 x 9	37-48
SCANSAR			
Etroit	305	50 x 50	20-40
Large	510	100 x 100	20-49
Etendu			
Haut	75	22-19 x 28	50-60
Bas	170	63-28 x 28	10-23

* R = « Range » ou Direction de visée - Az = Direction azimutale

Tableau 3 : Caractéristiques des modes d'acquisition de RADARSAT

la direction azimutale, et une largeur de fauchée de 50 km. Le mode Fin peut se découper en 5 sous-modes : F1 ($\theta=37$ à 40°), F2 ($\theta=39$ à 42°), F3 ($\theta=41$ à 44°), F4 ($\theta=43$ à 46°), F5 ($\theta=45$ à 48°). D'autres configurations, en terme de résolution spatiale, largeur de fauchée et incidence sont également disponibles (Tableau 3). Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé principalement des images en mode Standard S1 et en mode Fin F3. Quelques acquisitions en mode S3, S6, S7 et F3 ont également été utilisées.

Des capteurs futurs vont faire suite aux capteurs existants. On peut noter le capteur ASAR sur ENVISAT, dérivé de la série ERS qui, outre sa configuration : bande C, 25 m de résolution, répétitivité temporelle de 35 jours, présentera des capacités multi-incidence et multi-polarisation et permettra l'acquisition de couples HH-VV, VV-VH ou HH-HV. ENVISAT proposera également un mode large fauchée (150 m de résolution) et observation globale (1000 m de résolution). Le capteur RADARSAT-1 sera également suivi d'une série de capteurs tels que RADARSAT-2 dont l'orbite devrait passer d'héliosynchrone à quasi-polaire et enfin, RADARSAT-3 conçu pour une durée de vie 10 ans.

I-2 Cadre des expériences

Les travaux de recherche présentés ont été effectués dans le cadre des deux projets suivants :

- 1- Le projet SARI « Satellite Assessment of Rice in Indonesia », lancé en 1993 à l'initiative de la Commission Européenne et du gouvernement indonésien. Ce travail correspond à la phase I (étude de faisabilité) d'une étude visant à utiliser les données ERS pour la cartographie et le suivi du riz en Indonésie.
- 2- Le projet ADRO « Application Development Research Opportunity », dont le but est de promouvoir le développement d'applications basées sur les données issues du satellite canadien RADARSAT.

Dans le cadre du projet SARI, les données du satellite européen ERS-1 ont été acquises dans le but d'évaluer leur capacité pour la cartographie et le suivi des surfaces rizicoles en Indonésie et, à un moindre niveau, les conditions de croissance du riz. Des campagnes de mesures de terrain ont ainsi été menées sur le site indonésien de Semarang durant la période d'acquisition des données radar (Le Toan et al., 1997).

En 1996, avec le lancement du satellite canadien RADARSAT, le projet ADRO a été initié par les gouvernements canadien et américain ainsi que par la société RADARSAT International. C'est dans le cadre de ce projet que les données du satellite RADARSAT ont été

acquises sur le site indonésien de Jatisari. Parallèlement aux acquisitions satellites, des mesures de terrain ont également été réalisées. L'objectif de ce projet était de valider le potentiel du capteur RADARSAT pour le suivi des zones de culture du riz (Ribbes et Le Toan, 1998a).

I-3 Les sites d'étude



Figure 10 : Sites d'Etude en Indonésie : Jatisari et Semarang

Les sites d'étude ont été choisis de façon à obtenir des données pour des conditions de culture et des environnements différents. Ainsi des données ont été acquises sur des sites tropicaux (Indonésie - Figure 10) et ont été comparées à celles mesurées sur un site tempéré (Japon - Figure 11) - (Kurosu et al., 1995). Les variétés cultivées sur les sites indonésiens ont une croissance rapide (cycles de 120-130 jours) alors que les variétés cultivées sur le site japonais ont une croissance plus longue (150 jours).

En Indonésie, deux sites ont été choisis : Jatisari et Semarang, le premier situé sur une des plaines les plus fertiles de l'île de Java, le second, sur une région beaucoup plus hétérogène incluant des zones de relief. Le jeu de données issu du site de Jatisari, plus détaillé et complet, a été utilisé pour la description de la plante dans le but de développer un modèle théorique de rétrodiffusion des plantes de riz.

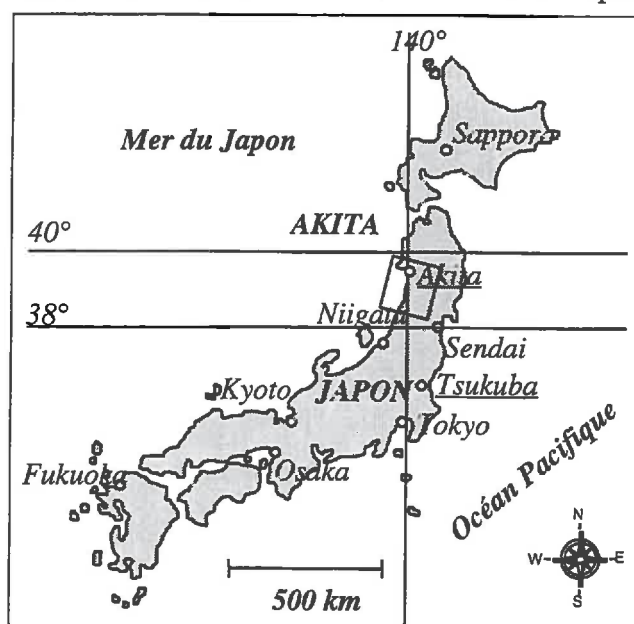


Figure 11 : Site d'Etude au Japon : Akita

I-3-1 Jatisari - INDONESIE (Java)

Le site test de Jatisari est situé en Indonésie, sur l'île de Java, à 70 km à l'Est de Jakarta (107°33'E - 6°22'S). La région est une plaine alluviale consacrée à la culture intensive de riz irrigué. L'approvisionnement en eau vient du barrage de Jatiluhur qui se situe au Sud-Ouest de la zone. Le périmètre irrigué de Jatiluhur couvre 240 000 ha et constitue une des plaines les plus fertiles de Java. Plus au sud, le paysage présente des ondulations douces avec une occupation très variée : riz pluvial dont une partie est déjà en terrasse, écosystème agro-forestier avec arbres fruitiers (durian, rambutan), manioc, maïs, prairies, et de grandes plantations d'hévéa, canne à sucre, cocotiers, teck. La partie Sud du site est constituée de collines s'élevant rapidement jusqu'à des reliefs volcaniques atteignant 2000 m. La plupart des routes principales sont bordées, sur une largeur de 100 m, par un ruban d'habitations entourées de jardins, arbres fruitiers et potagers.

La riziculture comprend en moyenne deux cycles par an. En général, la saison sèche débute en Mars-Avril et la saison humide en Novembre. Les champs de riz individuels mesurent environ 1 à 2 ha mais sont regroupés en fonction du calendrier d'irrigation en 4 groupes appelés Golongans (notés I à IV). La taille d'un Golongan est de l'ordre de quelques milliers d'hectares. Les champs, au sein d'un Golongan, suivent le même cycle de croissance. Ainsi, à une date donnée, le site est constitué de zones de rizières homogènes dans l'espace et le temps, dont la surface est bien supérieure à la celle d'un champ. La variété principale de paddy IR64 (*O. sativa indica*), a un cycle court qui permet au moins deux récoltes par an. La durée totale du cycle moyen est de 130 jours.

La mise en eau (quelques millimètres) des champs irrigués par le barrage de Jatiluhur intervient immédiatement après le semis. Le niveau d'eau dans les champs augmente progressivement, atteignant un maximum de 10 cm, puis diminue jusqu'au drainage complet du champ, deux semaines avant la récolte. Les dates de démarrage des Golongans sont décalées de 15 jours. Le calendrier en

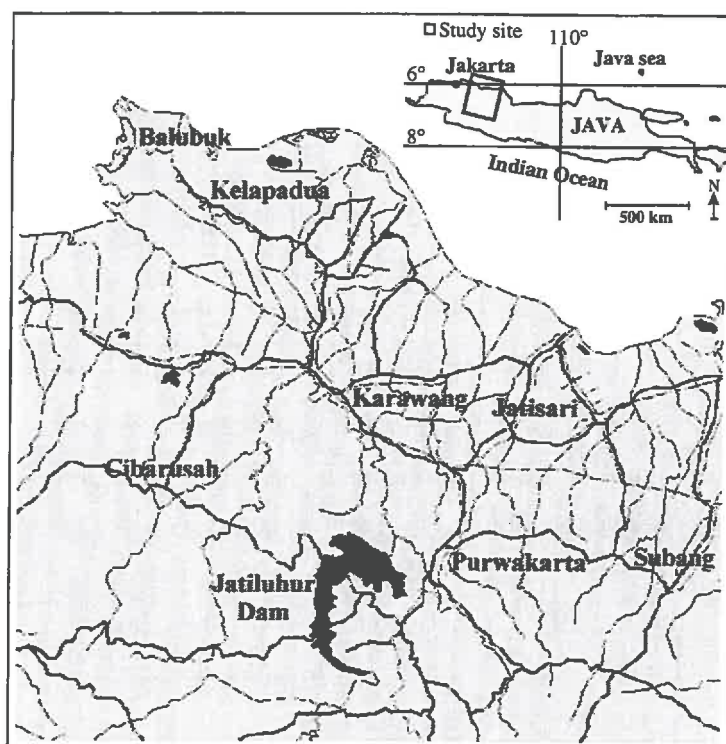


Figure 12 : Plaine de Jatiluhur

saison sèche change suivant l'importance des pluies contrairement à celui de la saison humide qui reste assez stable d'une année à l'autre. Pour la saison humide de 96/97, le semis débute à la mi-Novembre, début Décembre, mi-Décembre et début Janvier pour, respectivement, les Golongans I, II, III et IV.

Les mesures de terrain détaillées ont été réalisées sur une quinzaine de champs situés autour de 3 villages (Jatisari, Ciberes, et Cikalongsari). Ces champs mesurent environ 2 ha.

I-3-2 Semarang - INDONESIE (Java)

Le site de Semarang est situé au centre de l'île de Java, en Indonésie (110°15'E - 6°34' S). Les surfaces agricoles sont dominées par des rizières situées dans une plaine inondée. Les champs de riz ont des dimensions limitées et très variables souvent inférieures à 1 ha et présentent une grande variation spatiale. Le site comprend, au Nord, une zone de plaine rizicole, et au Sud, une zone montagneuse avec des rizières plus éparses. Au Nord-Ouest de la zone, se trouve une zone importante de rizières en terrasses.

Sur ce site, la variété cultivée est également issue du groupe génétique *O. sativa indica*. Le cycle de croissance du riz est légèrement plus court qu'à Jatisari, environ 120 jours, ce qui permet 2 à 3 cultures par an. La saison sèche débute généralement en Mars et la saison humide en Novembre. Cependant, un décalage de près de 6 semaines peut être observé entre les rizières précoces et les rizières tardives, en raison des disponibilités en eau et en main d'œuvre. La technique de plantation utilisée est soit celle du semis direct, soit celle du repiquage (après début de croissance en pépinière).

Des mesures ont été effectuées sur une dizaine de champs dont quatre ont été étudiés en détail : Kuwu, Dempet et Gajah, situés en plaine aux rendements élevés, ainsi qu'Ambarawa, situé dans la zone montagneuse, aux rendements plus réduits. Ces champs mesurent environ 2 ha.

I-3-3 Akita - JAPON (Honshu)

Le site d'Akita a été sélectionné par Kurosu et al., 1995. Il est constitué des champs de riz de l'Agricultural Prefectural College of Akita (APCA) et se situe aux alentours du 39°N-140°E. Les champs tests mesurent environ 300 m x 1 km, et sont divisés par une route de 13 m de large en deux sections de 140 m x 900 m.

Sur ce site, c'est la technique du repiquage qui domine. Les variétés utilisées, issues du groupe génétique *O. sativa japonica* ont un cycle de croissance long qui dure environ 150 jours, et s'étend de Juin à Octobre. A Akita, les champs sont repiqués de façon mécanique, selon des directions de rangées très strictes, et font l'objet d'une seule récolte par an.

I -4 Les données de terrain

I -4-1 Campagne de mesures

L'ensemble des campagnes de mesures a été réalisé suivant un plan de collecte de données précis, basé sur celui décrit par Le Toan (1995). Ces campagnes de mesures, effectuées au court du cycle de croissance de la plante, ont deux objectifs :

- L'inversion en paramètres : dans ce cas là, seul un petit nombre de paramètres clés doit être mesuré tels que de l'âge de la plante, sa hauteur ou sa biomasse.
- Le développement d'un modèle théorique de rétrodiffusion radar des plantes de riz. Cela nécessite la connaissance d'une grande quantité de paramètres de façon à décrire la plante précisément pour bien modéliser l'interaction entre l'onde radar et le couvert végétal.

Il est important de choisir des champs ou des groupes de champs qui peuvent être facilement localisables et qui présentent une structure homogène sur une surface suffisamment importante (au moins 2 ha) pour une bonne estimation de la rétrodiffusion radar. Les paramètres doivent être mesurés à différents stades de croissance (Figure 13) pour avoir des informations tout au long du cycle.

1- Les paramètres généraux de la culture qui incluent des informations telles que la variété de riz cultivée, les méthodes et dates de plantation (semis direct manuel ou mécanisé, repiquage), date de récolte, le rendement, le stade phénologique, ainsi que la hauteur de la couche d'eau et l'état du sol. Généralement, la saison débute en Mai-Juin avec le début des moussons. La première culture est semée à la volée dans certaines parties d'Asie mais est le plus souvent repiquée dans la plupart des autres pays en Juin, Juillet et Août. La seconde culture est généralement plantée en Novembre-Décembre de façon à achever son cycle avant les mois particulièrement chaud d'Avril et Mai. Généralement la plante est cultivée sous une épaisseur d'eau de 5 à 10 cm mais le niveau fluctue selon le cycle de croissance. Quelques semaines avant la récolte, durant la phase de maturation, l'eau est lentement drainée. Cependant, pour les sols très filtrants, la nappe d'eau est maintenue jusque dans les derniers jours qui précèdent la maturité (Dobelmann, 1976).



1 - Repiquage



2 - Quelques jours



3 - Tallage (25 jours)



4 - Epiaison (82 jours)



5 - Floraison (98 jours)



6 - Prêt pour la récolte (118 jours)

Figure 13 : Les campagnes de mesure - rizières à différents stades de croissance

2- Les paramètres concernant la géométrie de plantation (Figure 14), tels que la distance, la direction et la densité de plantation. Les espacements de plantation varient de 15 à 40 cm suivant les variétés et la fertilité du sol, mais se situent généralement autour de 20-30 cm (Coyaud, 1950).

3- Les paramètres concernant la structure de la plante

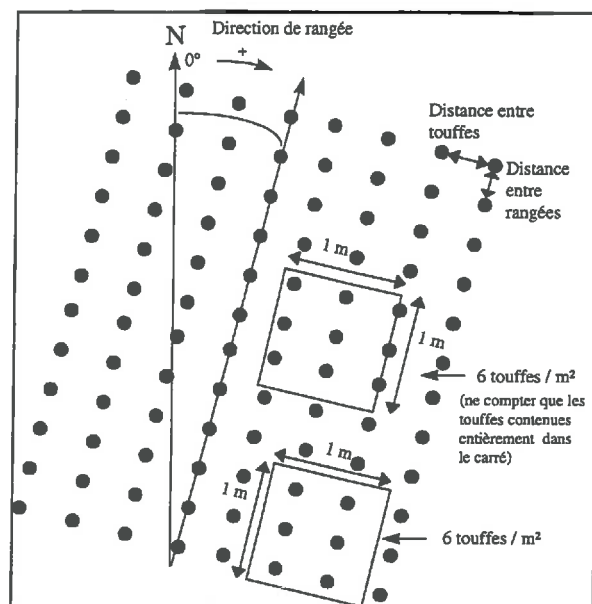


Figure 14 : Mesure de la géométrie de plantation

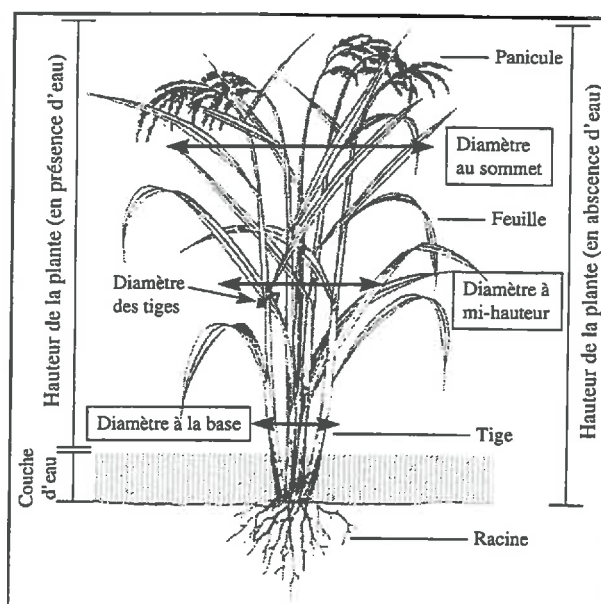


Figure 15 : Mesure des paramètres de la plante

- La touffe : densité (par m^2) (Figure 14), diamètre et hauteur (Figure 15), homogénéité du couvert (Figure 16) et enfin, les poids sec et humide. Durant le stade végétatif, la plante s'allonge normalement à une vitesse de 2 à 10 cm/jour pour mesurer environ 1 m en fin de cycle. La croissance peut cependant aller jusqu'à 25 cm/jour pour les riz flottants pour atteindre des hauteurs souvent supérieures à 6 m. Après la floraison, la croissance de la plante s'arrête.

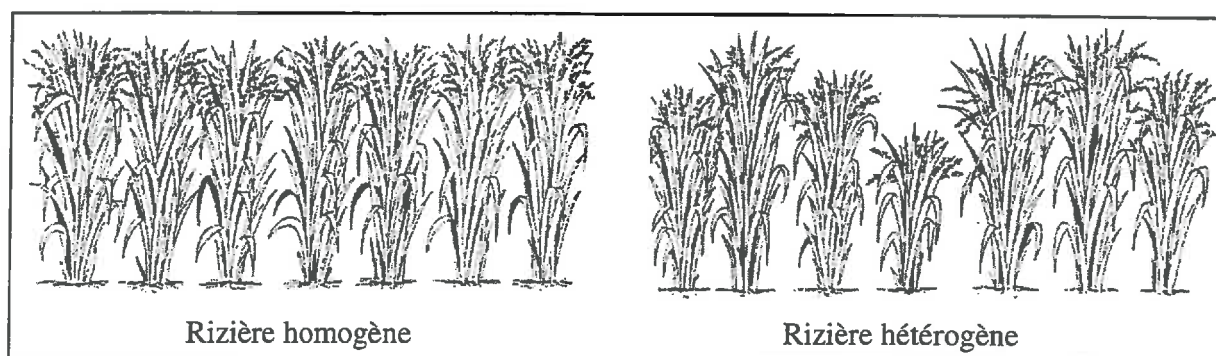


Figure 16 : Hétérogénéité du couvert

- **Les tiges** : densité (par touffe), diamètre (Figure 15), inclinaison (Figure 17a).
- **Les feuilles** : densité (par tige), épaisseur, longueur, largeur, inclinaison et angle de courbure (Figure 17b). Une tige de riz fournit au cours de sa croissance 10 à 20 feuilles dont seulement 5 à 10 vivent à la fois, les autres se desséchant au fur et à mesure du développement de la plante. Après la sortie de la deuxième feuille, la dimension des feuilles va en croissant. Les riz flottants ou demi-flottants ont généralement des feuilles plus longues que les riz ordinaires. D'autre part, les variétés à cycle court ont, le plus souvent, moins de feuilles que celles à cycle long. En début de cycle les feuilles sont généralement orientées verticalement, puis au cours de leur croissance, présentent un angle d'inclinaison par rapport à la verticale de plus en plus grand. Lorsqu'une certaine longueur est atteinte, l'extrémité des feuilles retombe vers le sol. Selon les variétés, et surtout la longueur des feuilles, cette « courbure » des feuilles est plus ou moins importante.
- **La panicule** : densité (par touffe), longueur, largeur, inclinaison (Figure 17c), poids sec et humide. Généralement, les panicules ont une longueur de 20 à 25 cm mais une variation de 10 à 40 cm peut être rencontrée selon la variété. Les variétés à grosse paille et à tiges longues ont généralement des panicules longues, alors que les variétés à fort tallage et à paille fine ont des panicules plus courtes. De plus, chez les variétés à port bas, hâtives, à épillets gros et courts, la panicule est droite ou presque alors que chez les variétés à port élevé, à cycle long, elle peut être courbée (Coyaud, 1950).
- **Les grains** (à mesurer une fois que le stade floraison est terminé) : nombre par panicule, longueur, épaisseur.

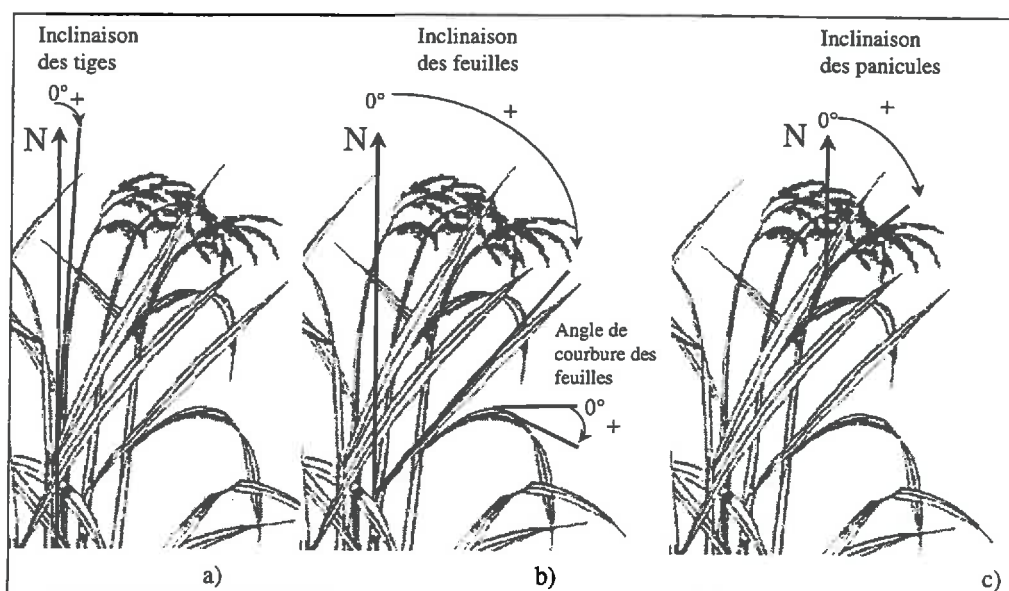


Figure 17 : Mesure de l'inclinaison des tiges (a), de l'inclinaison et de l'angle de courbure des feuilles (b) et de l'inclinaison des panicules (c)

I-4-2 Analyse des données et résultats

1- Pour l'inversion en paramètres des plantes

Les paramètres considérés pour l'inversion sont ceux qui vont permettre le suivi de la croissance de la plante et qui présentent un intérêt en terme de production. Il s'agit donc de paramètres tels que l'âge, la hauteur ou la biomasse de la plante. Pour cette analyse, les données de l'ensemble des sites ont été utilisées, de façon à analyser l'évolution de ces paramètres pour différentes conditions culturales. Ainsi, des relations ont pu être mises en évidence entre l'âge et la hauteur ou la biomasse des plantes.

La Figure 18 présente la variation temporelle de la hauteur des plantes mesurée sur l'ensemble des sites test. Une croissance générale est observée, jusqu'au début du stade reproductif (floraison) puis reste stable (0,9-1 m) jusqu'à la fin du cycle de croissance. Pour les variétés tropicales, à cycle court, (sites de Semarang et Jatisari), le plateau est atteint vers 80-90 jours, alors qu'il est atteint vers 100-110 jours pour la variété tempérée, à cycle plus long (site d'Akita). En effet, c'est la durée de la phase végétative qui détermine la durée totale du cycle de croissance, la durée de la phase reproductive étant relativement constante.

L'évolution de la biomasse humide de la plante (g/m^2) au cours du cycle de croissance est présentée Figure 19. En début de cycle, jusqu'à environ 80 jours, les 3 variétés ont une évolution similaire. Ensuite, on observe une séparation entre le jeu de données de Jatisari et celui d'Akita. Les variétés tropicales ont en effet généralement un tallage plus important que les variétés tempérées, ce qui peut expliquer des valeurs de biomasse plus élevées pour le site de Jatisari.

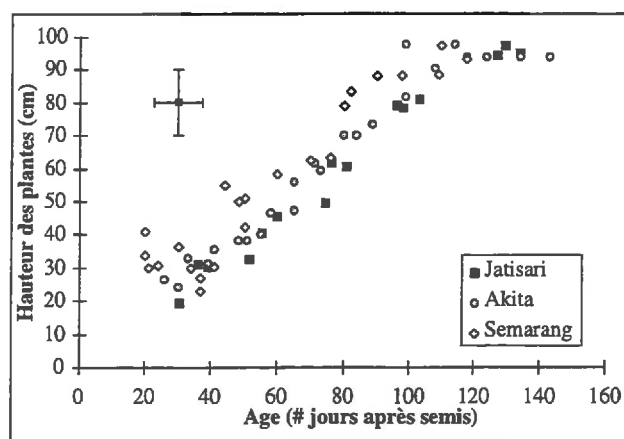


Figure 18 : Evolution de la hauteur des plantes au cours du cycle de croissance pour l'ensemble des sites d'étude

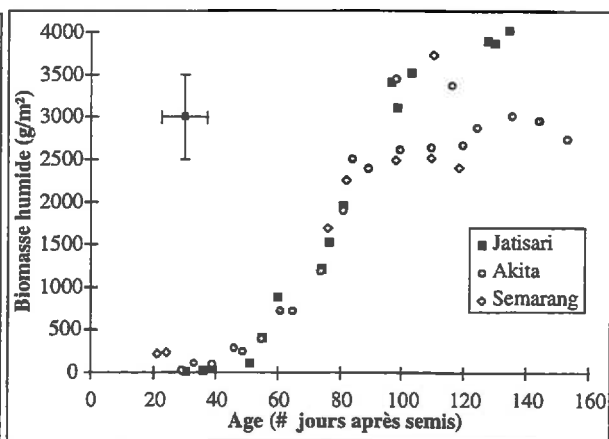


Figure 19 : Evolution de la biomasse des plantes au cours du cycle de croissance pour l'ensemble des sites d'étude

La dispersion des données résulte d'une part de la précision des mesures sur le terrain, mais aussi de l'incertitude quant à l'âge de la plante au moment du repiquage (entre 25 et 35 jours). Il faut également prendre en compte les techniques culturales qui peuvent avoir une action importante sur la durée du cycle végétatif. Citons en particulier l'action retardatrice du repiquage, ainsi qu'un tallage beaucoup plus développé qu'en semis direct. La densité de plantation agit également sur la durée du cycle végétatif. Ces dispersions sont particulièrement importantes pour les paramètres de biomasse (Figure 19), notamment en fin de cycle. D'autre part la durée du séjour en pépinière où les plantes resserrées sont moins éclairées, a une influence très nette sur la plante adulte et ses diverses parties dont la hauteur de la plante, la longueur et la largeur des feuilles et la biomasse (Coyaud, 1950).

2- Pour le développement d'un modèle théorique de rétrodiffusion du riz :

Le jeu de données collecté sur le site de Jatisari permet de décrire avec précision la structure de la plante tout au long du cycle de croissance.

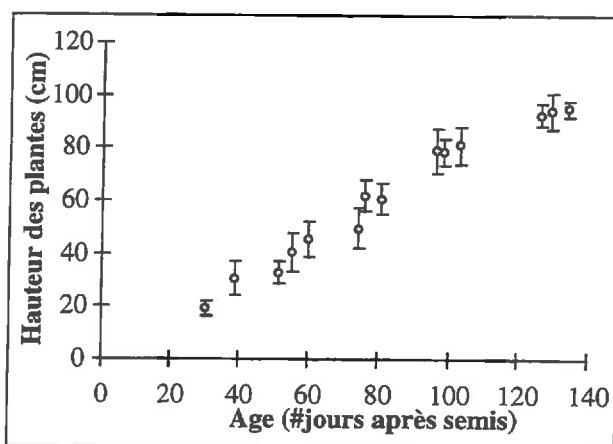


Figure 20 : Evolution de la hauteur des plantes au cours du cycle de croissance (Jatisari)

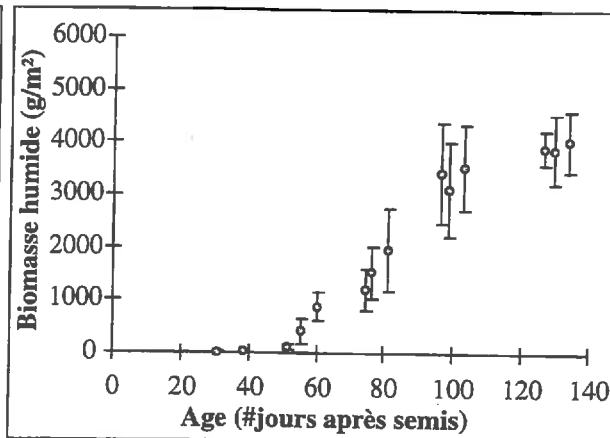


Figure 21 : Evolution de la biomasse humide au cours du cycle de croissance (Jatisari)

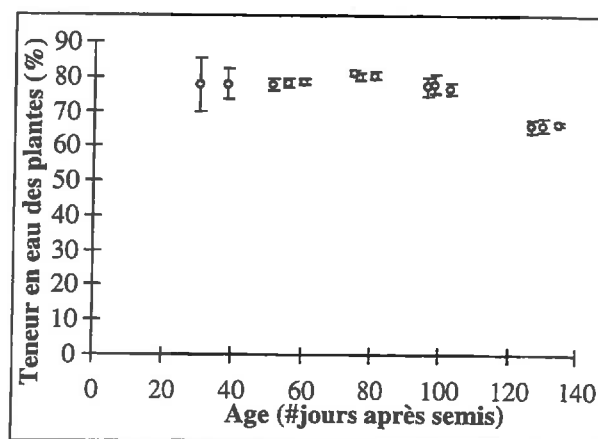


Figure 22 : Teneur en eau des plantes au cours du cycle de croissance

- Biomasse, hauteur et teneur en eau :** Si l'on reprend les paramètres observés précédemment (Figure 20 et Figure 21) on retrouve une croissance en hauteur de la plante jusqu'au début du stade reproductif à environ 90 jours. Les écarts types restent inférieurs à 7 cm et assez constants tout au long du cycle. La croissance en biomasse reste faible jusqu'à environ 50-60 jours puis augmente rapidement et se stabilise vers 110-120 jours, un peu plus tard que la hauteur de la plante en raison du développement de la panicule. Un peu plus de 50 % de la production de biomasse a lieu durant la phase végétative, puisque le stade reproductif débute alors que le niveau de biomasse humide est d'environ 2500 g/m². Les écarts types, bas au départ, sont plus importants en fin de cycle. Les facteurs de dispersion ont été expliqués précédemment avec les données acquises sur les sites de Semarang, Jatisari et Akita. La teneur en eau des plantes (Figure 22) est relativement constante (entre 70 et 80%), jusqu'à environ 100 jours puis diminue. Cette diminution, qui correspond d'ailleurs à la fin de l'irrigation, apparaît dès le début de la phase de maturation, durant laquelle la plante s'assèche.
- Les tiges et les feuilles :** Le nombre de tiges par touffe (Figure 23) augmente jusqu'à environ 60 jours (« plateau de tallage »), puis reste constant jusqu'à la fin du cycle. En effet, le tallage détermine directement le nombre futur de tiges. Le nombre de feuilles par tige (Figure 24) augmente de manière linéaire du stade 3 feuilles (20 jours après semis) à 5 feuilles environ au début du stade reproductif (100 jours après semis), puis diminue vers 4 feuilles par tige. Ainsi, en fin de cycle, les touffes seront constituées d'environ 20 ± 5 tiges, sur lesquelles seront fixées au maximum 5 ± 2 feuilles. Le diamètre des tiges (Figure 25) est constant ($0,5 \pm 0,1$ cm) à partir du stade 60-80 jours. Les feuilles quant à elles s'allongent (Figure 26) et s'élargissent (Figure 27) régulièrement jusqu'au début du stade reproductif. En fin de cycle, elles mesurent $45,5 \pm 5$ cm de long et $1,4 \pm 0,2$ cm de large. Par contre, elles deviennent de plus en plus épaisses (Figure 28) au cours du cycle de croissance, pour atteindre 4,5 mm en fin de cycle.

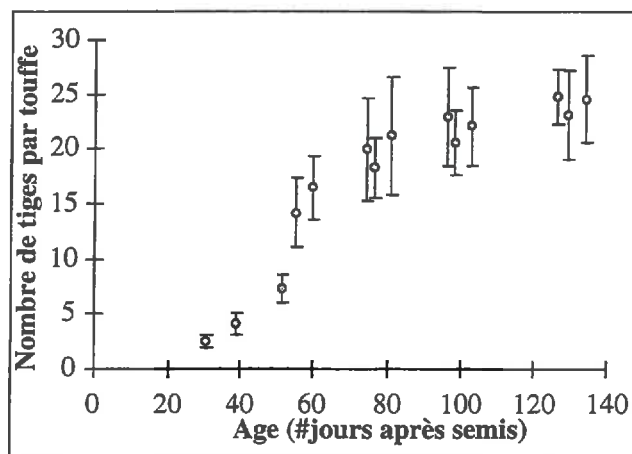


Figure 23 : Densité des tiges

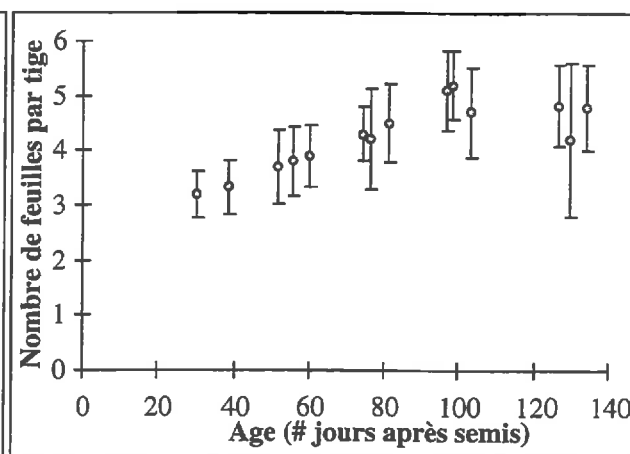


Figure 24 : Densité des feuilles

Evolution de différents organes de la plante au cours du cycle de croissance (Jatisari)

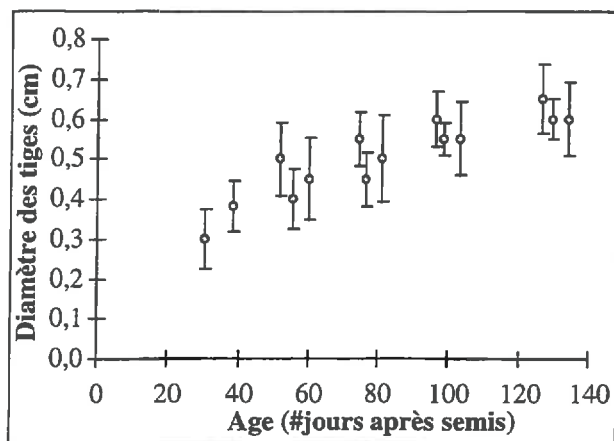


Figure 25 : Diamètre des tiges

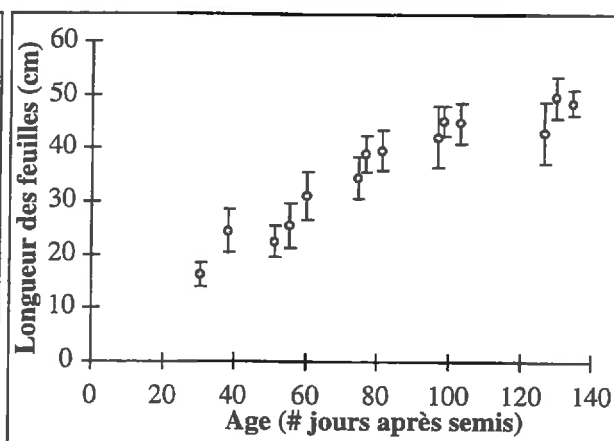


Figure 26 : Longueur des feuilles

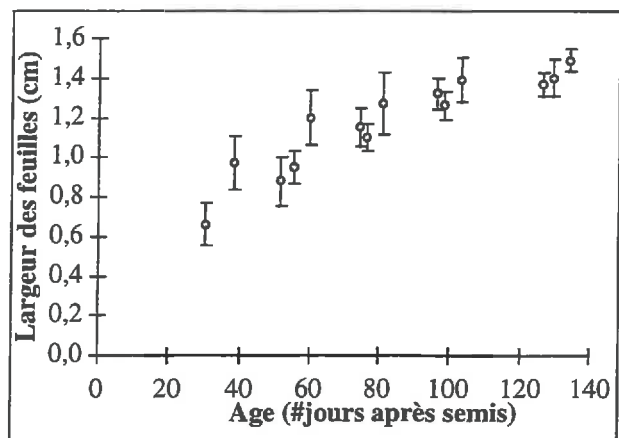


Figure 27 : Largeur des feuilles

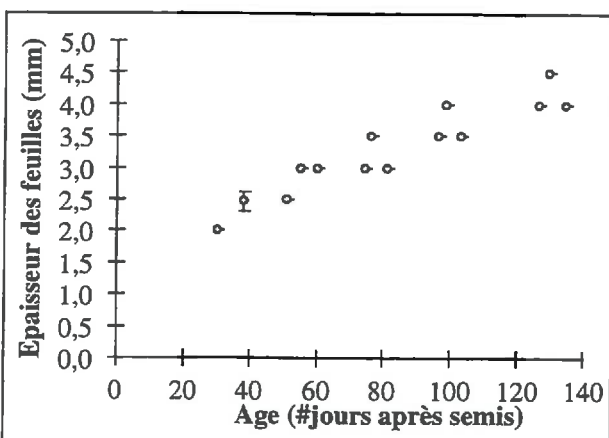


Figure 28 : Epaisseur des feuilles

- La géométrie de la plante : la Figure 29 présente les inclinaisons des tiges et des feuilles (angle par rapport à la verticale) ainsi que l'angle de courbure des feuilles (angle par rapport à l'horizontale) au cours du cycle de croissance. Jusqu'à 40 jours après semis environ, la plante est quasi verticale avec des inclinaisons de feuilles et de tiges inférieures à 10° . L'inclinaison des tiges croît de manière constante durant tout le cycle, variant de 0° à $18 \pm 4^\circ$. L'inclinaison des feuilles, qui inclue celle des tiges, croît de façon plus importante, et atteint $25 \pm 4^\circ$ en fin de cycle. La courbure des feuilles n'apparaît que vers 110 jours, lorsque l'inclinaison des feuilles dépasse 20° . Le diamètre des touffes à la base, à mi-hauteur et au sommet de la plante (Figure 30) permet également d'apprécier la verticalité de la touffe. En effet, plus la différence entre les 3 diamètres est importante, plus la plante est « ouverte » et donc moins elle est verticale. En début de cycle, et jusqu'à environ 40 jours, les 3 diamètres

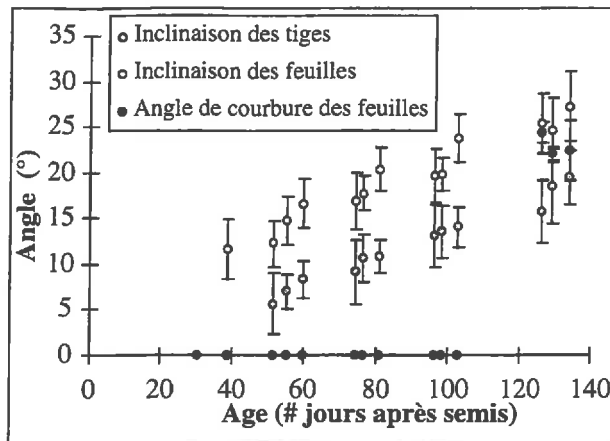


Figure 29 : Angles d'inclinaison et de courbure des tiges et des feuilles (Jatisari)

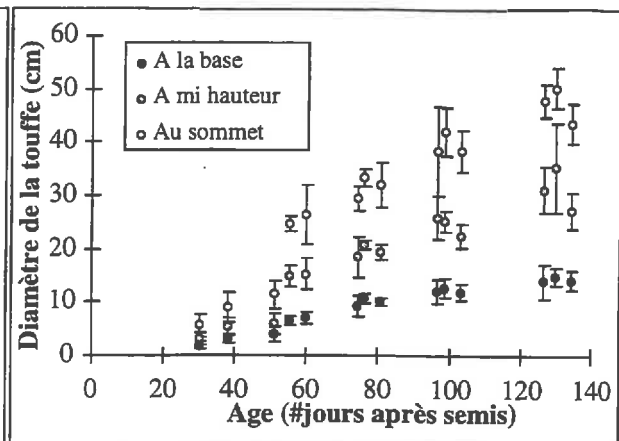


Figure 30 : Diamètre des touffes à différentes hauteurs (Jatisari)

sont proches. Ensuite, la différence entre les 3 diamètres ne cesse d'augmenter au cours du cycle pour dépasser 35 cm entre le sommet et la base de la plante en fin de cycle, le diamètre au sommet de la plante pouvant dépasser 45 cm. Ces valeurs sont en accord avec celles des angles d'inclinaison des feuilles. En effet, si l'on reprend les données collectées sur le site de Jatisari : soit une touffe de riz en fin de cycle (≈ 120 jours), de hauteur $h = 93$ cm, et de diamètre au sommet de la plante $d = 46$ cm, l'angle d'inclinaison des tiges est alors : $\arccos(h/(d^2 + h^2)^{-1/2}) = 26,32^\circ$, à comparer avec les $25,3^\circ$ mesurés sur le terrain.

- La panicule et les grains** : La campagne de mesures étant basée sur le calendrier d'acquisition des images radar, seule une série de mesures a pu être réalisée à un stade post-épiaison. Le Tableau 4 présente les résultats obtenus pour les différents paramètres des organes reproductifs, au stade 130 jours après semis (proche de la récolte). Les panicules sont au nombre de 23 ± 4 par touffe. Ce nombre correspond bien à la densité des tiges par touffe en fin de cycle (Figure 23). Ils présentent une longueur de 24 ± 3 cm, pour une biomasse humide de 1510 ± 480 g/m², et ont une teneur en eau de 44 ± 3 %. L'angle d'inclinaison des panicules est de $22 \pm 3,5^\circ$ par rapport à la verticale. Les grains, qui sont au nombre de 162 ± 40 par panicule ont une longueur de $8,47 \pm 0,5$ mm et une largeur de $3,35 \pm 0,4$ mm.

	Moyenne	Ecart type
PANICULES		
Nombre par touffe	23,35	3,49
Longueur (cm)	23,97	2,75
Angle d'inclinaison (°)	22,08	3,45
Teneur en eau (%)	43,35	2,59
Biomasse humide (g/m ²)	1506,05	476,36
GRAINS		
Nombre par panicule	162	40
Longueur (mm)	8,47	0,51
Largeur (mm)	3,35	0,34

Tableau 4 : Paramètres des panicules et des grains au stade 130 jours (Jatisari)

I-5 Les données radar

I-5-1 Acquisition des données radar

I-5-1-1 Données ERS (sites de Semarang et d'Akita)

Les données ERS (C-VV, 23°) ont été acquises sur le site de Semarang en Indonésie et sur le site d'Akita au Japon (Kurosu et al., 1995).

Pour le site de Semarang, les images ont été commandées durant la phase de haute répétitivité temporelle de 1994 de ERS-1 qui permettait l'acquisition d'images, sur certains sites, tous les 3 jours. Cependant, sur 18 images commandées à la station de Pare Pare, en Indonésie, 4 seulement ont été acquises (Figure 31). Elles sont datées du 23 Janvier, 10 Février, 16 Février et 6 Mars 1994.

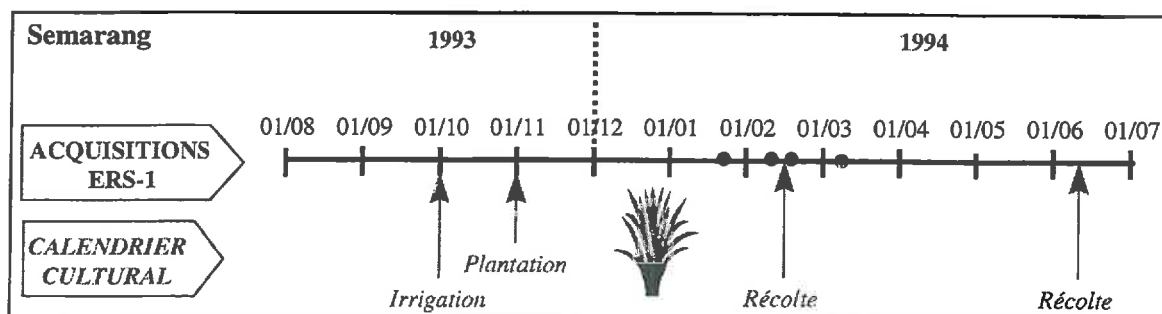


Figure 31 : Calendrier d'acquisition des données ERS sur le site de Semarang

Sur l'image ERS du 6 Mars 94 (Figure 33), les rizières se situent près du littoral Nord, de part et d'autre de la ville de Semarang. Les rizières présentent des niveaux de gris très variables allant du sombre au clair. Dans la partie sud de l'image, se trouve la région montagneuse volcanique.

A Akita, les données ont été acquises sur une période de 2 ans, de Juin à Octobre 1992 et de Juin à Octobre 1993, sur le site de l'APCA (Agricultural Prefectural College of Akita). Les données comprennent 8 acquisitions en 1992 et 14 en 1993 pour lesquelles à la fois les modes ascendants et descendants ont été utilisés. Ces données couvrent l'ensemble des cycles de croissance des rizières des deux années (Figure 32).

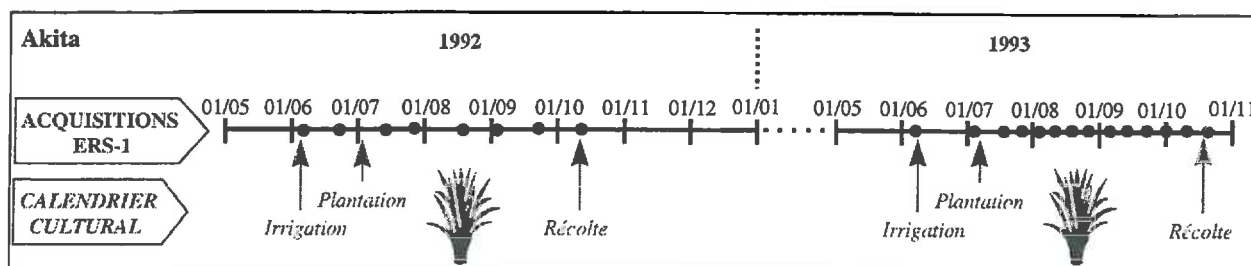


Figure 32 : Calendrier d'acquisition des données ERS au site d'Akita

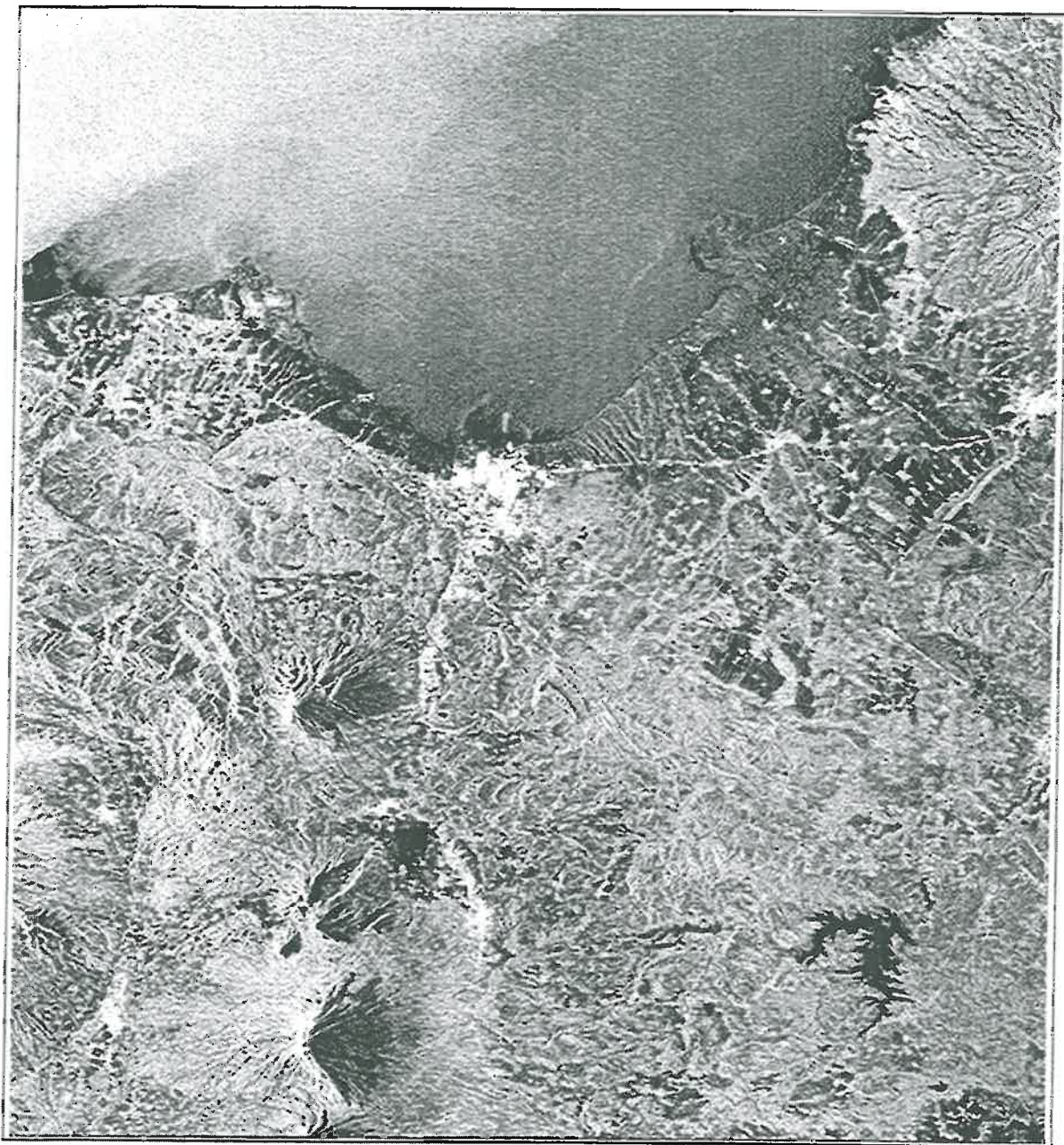


Figure 33 : Image ERS acquise le 06/03/1994

Coordonnées centrales : S06°55' / E110°41'

100 x 100 km

I-5-1-2 Données RADARSAT (site de Jatisari)

Les données radar ont été principalement acquises durant la saison humide de Novembre 1996 à Février 1997, sur le site de Jatisari, en Indonésie. Elles incluent des données en mode Standard S1 (C-HH, 23°) sur une zone d'environ 100 x 100 km et des données en mode Fin F3 (C-HH, 43°) sur une surface d'environ 40 x 50 km. Les images en mode Standard S1 ont été acquises aux dates suivantes (Figure 34) : 1^{er} Octobre 1996, 18 Novembre 1996, 12 Décembre 1996, 5 Janvier 1997, 29 Janvier 1997 et 18 Mars 1997. Les images en mode Fin F3 ont été acquises aux dates suivantes : 15 Novembre 1996, 9 Décembre 1996, 26 Janvier 1997, 19 Février 1997 et 15 Mars 1997.

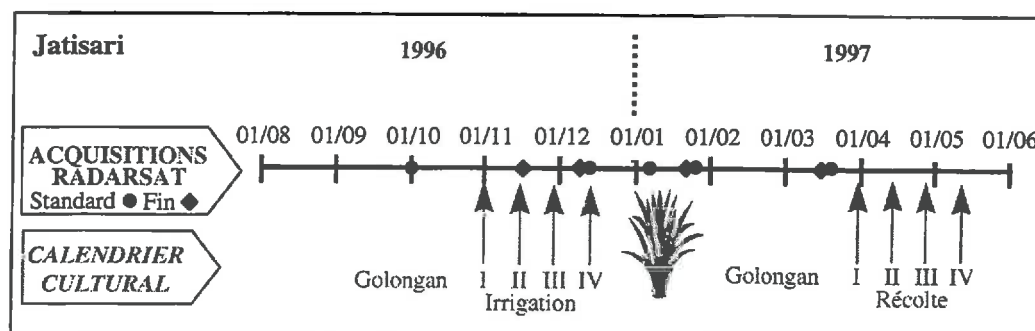


Figure 34 : Calendrier d'acquisition des données RADARSAT sur le site de Jatisari

L'image RADARSAT en mode S1 du 18 Novembre 1996 (Figure 35) est divisée au Nord par la plaine de Jatiluhur et au Sud par une zone volcanique à fort relief. Les rizières se situent près du littoral Nord. Elles présentent des niveaux de gris très variables allant du sombre au clair. Au Sud-Ouest de l'image, se trouve, en très sombre, le barrage de Jatiluhur.

Sur l'image RADARSAT en mode F3 du 15 Novembre (Figure 36), le parcellaire ainsi que certaines structures telles que les routes ou la voie ferrée qui traverse l'image d'Est en Ouest sont nettement décelables. Tout le Nord de l'image est constitué de rizières irriguées. Encore une fois, leurs niveaux de gris sont très variables.

Après cette campagne, de nouvelles images RADARSAT, à différents modes, ont été acquises en Avril 1998 et en Juin 1998, afin de vérifier les observations résultants de l'analyse du jeu de données de 1996-97. Le couple d'Avril 1998 comprend une image en mode Standard S7 ($\theta=46^\circ$) et une image en mode Standard S3 ($\theta=34^\circ$), acquises respectivement le 10 et le 13 Avril 1998. La série de Juin 1998, comprend une image en mode Fin F1 ($\theta=38^\circ$), une image en mode Standard S6 ($\theta=44^\circ$) et une image en mode Standard S1 ($\theta=23^\circ$), acquises respectivement les 7, 14 et 17 Juin 1998.

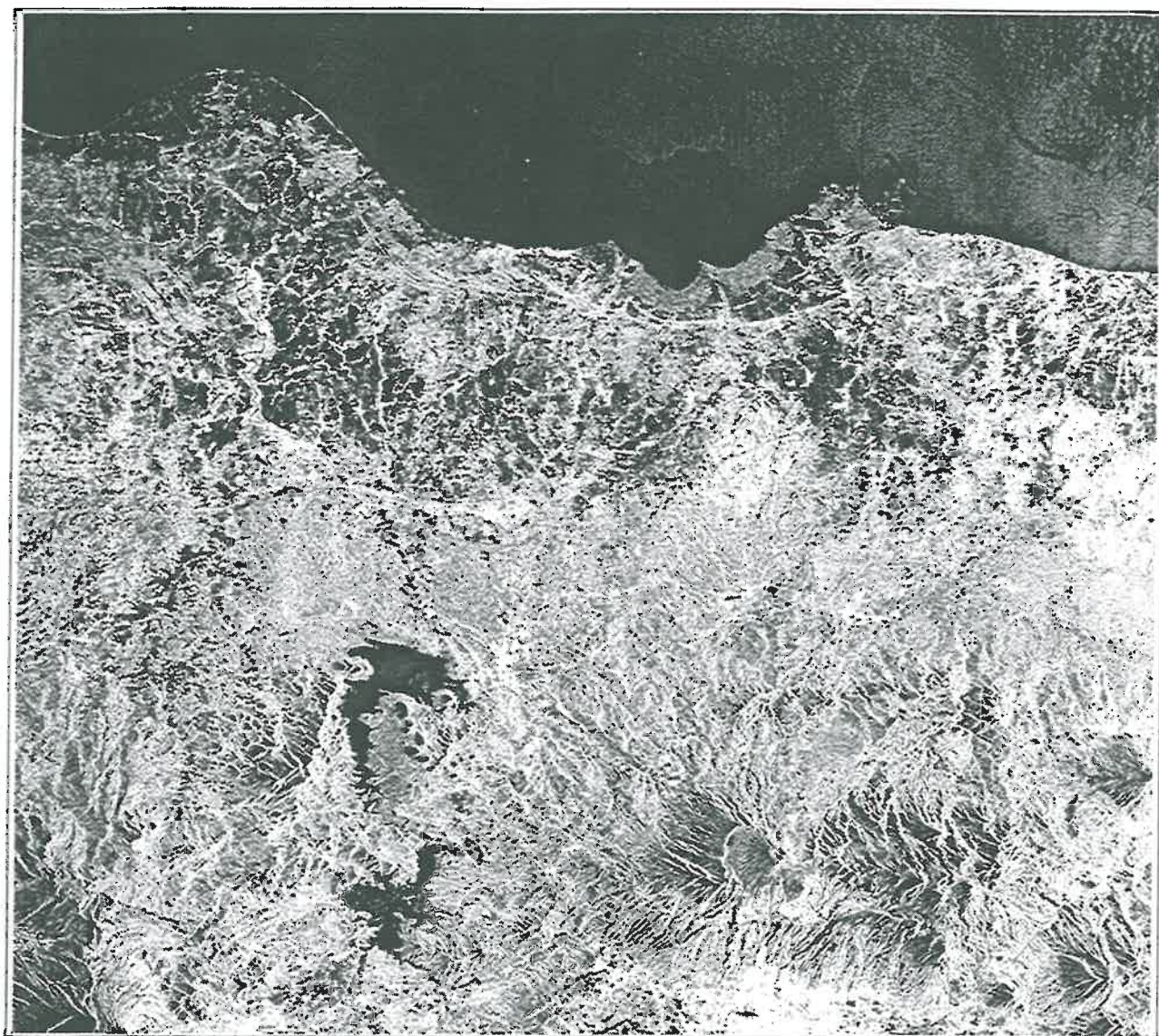


Figure 35 : Image RADARSAT Mode Standard S1 acquise le 18/11/1996

Coordonnées centrales : S06°27' / E107°30'

110 x 100 km

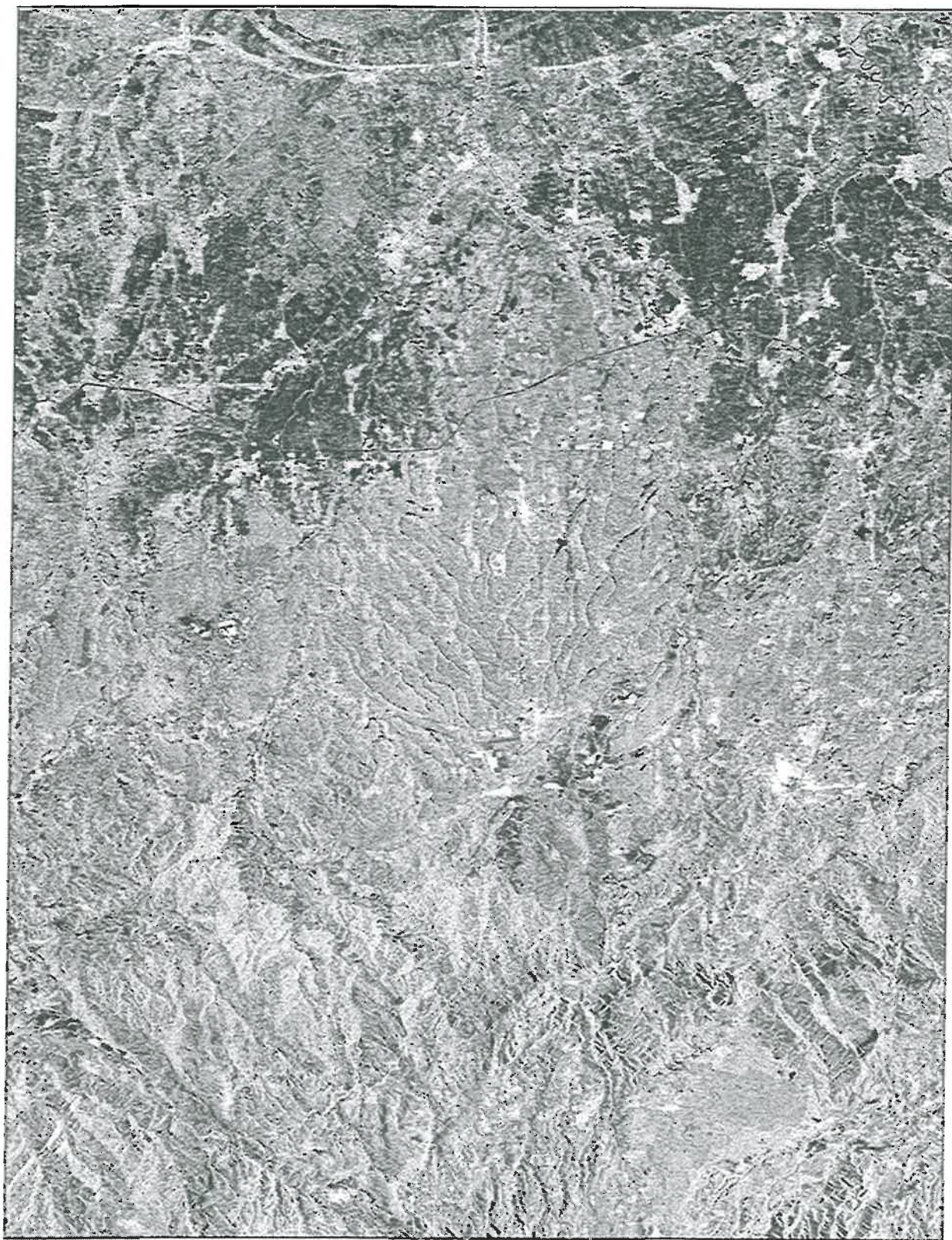


Figure 36 : Image RADARSAT Mode Fin F3 acquise le 15/11/1996

Coordonnées centrales : S06°2' / E107°30' - 35 x 50 km

I-5-1-3 Données JERS-1 (Rosenqvist et Oguma, 1995)

Des données du satellite JERS-1 (L-HH, 35°) ont été acquises et étudiées par Rosenqvist et Oguma (1995) :

- En Malaisie péninsulaire, sur les sites de Kedah et Perlis (100°E-6,5°S), en Avril et Août 1994. Les rizières y ont un cycle de croissance d'environ 120 jours (Avril-Mai à Août-Septembre). Les pratiques culturales nécessitent un fort apport de main d'œuvre. La plantation s'y fait par repiquage manuel ou par un semis à la volée.
- Sur le site Japonais de Niigata (139°E-38°N) (Figure 11), tous les 44 jours durant la saison d'Avril à Octobre 1995. Ce site est caractérisé par une très forte mécanisation avec une plantation en ligne et des cycles de croissance d'environ 135 jours.

I-5-2 Etalonnage des images et extraction du coefficient de rétrodiffusion

Un radar imageur produit une image dans laquelle la valeur associée à chaque pixel est proportionnelle à la puissance du rayonnement électromagnétique rétrodiffusé par la portion de surface terrestre illuminée par le radar. L'équation radar donne la puissance moyenne rétrodiffusée en tout point de l'image (1) :

$$\overline{P}_R = P_T \frac{G \cdot \lambda \cdot q}{(4 \cdot \pi \cdot R)^3} \sigma^\circ \quad (1)$$

avec \overline{P}_R = Puissance moyenne reçue (rétrodiffusée)

P_T = Puissance transmise

G = Gain d'antenne

λ = Longueur d'onde d'émission

q = Gains et pertes divers

R = Distance entre l'antenne et la surface imagée

σ° = Coefficient de rétrodiffusion radar (section efficace de diffusion radar par unité de surface de la cible).

Le coefficient de rétrodiffusion radar est généralement exprimé en décibels : $\sigma^\circ_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(\sigma^\circ)$. Il donne des informations sur la surface observée. Il est fonction de la longueur d'onde λ (ou de la fréquence f), de la polarisation de l'onde p et de l'angle d'incidence θ de l'onde incidente.

I-5-2-1 Données ERS (sites de Semarang et Akita)

Les images ont été étalonnées, et les coefficients de rétrodiffusion des champs tests extraits, selon la méthode décrite par Laur et al. (1996).

Pour les images ERS la relation entre l'intensité et le coefficient sous sa forme la plus simple est (2) :

$$\langle I \rangle = K \cdot \sigma^\circ \quad (2)$$

avec $\langle I \rangle$ = Intensité moyenne de la zone
 σ° = Coefficient de rétrodiffusion
 K = Constante d'étalonnage

Cependant K dépend de l'angle d'incidence θ . Ainsi, l'ESA donne la constante d'étalonnage K pour un angle d'incidence de référence $\theta_{ref} = 23^\circ$. On a donc (3) :

$$K(\theta) = K \cdot \frac{\sin \theta_{ref}}{\sin \theta} \quad (3)$$

L'équation (2) devient alors (4) :

$$\sigma^\circ = \frac{\langle I \rangle}{K(\theta)} = \frac{\langle I \rangle}{K} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \theta_{ref}} \quad \text{avec} \quad \langle I \rangle = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} DN_i^2 \quad (4)$$

avec DN = Compte numérique d'un pixel i donné

N = Nombre de pixels de la fenêtre (doit être supérieur à 250 pour assurer la validité de l'estimation de l'intensité moyenne)

Exprimée en décibel ($\sigma^\circ(dB) = (10 \cdot \log_{10} \sigma^\circ)$) l'équation (4) devient (5) :

$$\sigma^\circ(dB) = (10 \cdot \log_{10} \langle I \rangle) - (10 \cdot \log_{10} K) + (10 \cdot \log_{10} (\frac{\sin \theta}{\sin \theta_{ref}})) \quad (5)$$

$$\text{où} \quad \sigma^\circ(dB) = \langle I \rangle_{(dB)} - K_{(dB)} + \delta_{(dB)}$$

$$\text{avec} \quad \delta_{(dB)} = 10 \cdot \log_{10} (\frac{\sin \theta}{\sin \theta_{ref}})$$

Les angles d'incidence dans une image SAR-ERS1 varient de 19,5° à 26,6°. Le facteur de correction δ peut varier de -0.7 dB à +0.6 dB au sein d'une image.

I-5-2-2 Données RADARSAT (site de JATISARI)

Les images ont été étalonnées, et les coefficients de rétrodiffusion des champs tests extraits, selon la méthode décrite par Shepherd (1997).

Soit DN_j , le compte numérique d'un pixel j donné, la valeur de brillance correspondante β°_j (en dB), pour le pixel j s'écrit (6) où $A2_j$ = valeur du gain pour le $j^{\text{ème}}$ pixel et $A3$ = valeur de compensation :

$$\beta^\circ_j = 10 \log_{10} \left[(DN_j^2 + A3) / A2_j \right] \quad (6)$$

La brillance, convertie en coefficient de rétrodiffusion radar (σ°) s'écrit (7) où θ_j = angle d'incidence correspondant à la $j^{\text{ème}}$ colonne :

$$\sigma^\circ = \beta^\circ_j + 10 \log_{10} (\sin \theta_j) \quad (7)$$

I-5-2-3 Données JERS-1

Les données JERS-1 étant déjà corrigées de l'effet d'incidence, elle peuvent être étalonnées simplement, à l'aide d'une constante d'étalonnage (Shimada, 1993). Le coefficient de rétrodiffusion (σ°) est donné par (8) :

$$\sigma^\circ (dB) = (10 \log_{10} \langle I \rangle) - (10 \log_{10} K) \quad \text{avec} \quad \langle I \rangle = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} DN_i^2 \quad (8)$$

avec $\langle I \rangle$ = Intensité moyenne de la zone

K = Constante d'étalonnage

DN = Compte numérique d'un pixel i donné

N = Nombre de pixels de la fenêtre

I-5-3 Synthèse et analyse des données radar

Les données de terrain ont été collectées aux dates d'acquisition des données radar. Ainsi, il est possible d'analyser l'évolution de la rétrodiffusion radar des rizières en fonction des paramètres mesurés. L'extraction des σ^0 des champs test a été faite à partir des images étalonnées selon les indications de Laur et al. (1996) pour les images ERS et Shepherd (1997) pour les données RADARSAT.

Dans un premier temps, nous étudierons la variation de la rétrodiffusion radar des rizières pour la configuration correspondant à ERS : bande C, polarisation VV et $\theta=23^\circ$, avant d'analyser les différences observées lorsque d'autres configurations (JERS, RADARSAT) sont utilisées.

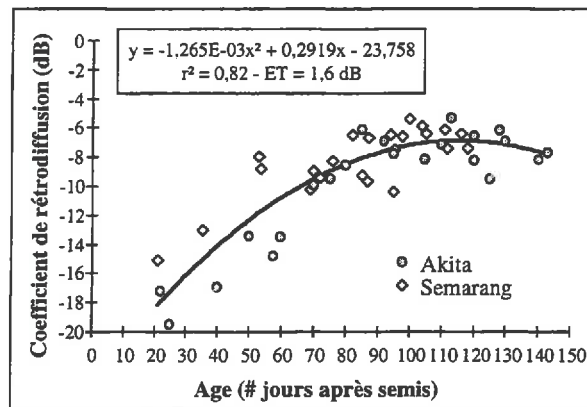
I-5-3-1 Les données ERS (C-VV-23°)

Les données de terrain ont été collectées sur les sites de Semarang (Indonésie) et d'Akita (Japon), ce qui nous permet de comparer les résultats obtenus pour des variétés tropicales et tempérées. Il en résulte que la rétrodiffusion du riz peut être caractérisée par :

1- Une très grande variation temporelle

Les Figures 37 à 39 présentent la variation de la rétrodiffusion en fonction de l'âge, de la hauteur et de la biomasse humide des plantes. Un écart de plus de 10 dB dans la rétrodiffusion des champs de riz peut être observé entre le début et la fin du cycle de croissance. Pour les deux jeux de données, le σ^0 augmente de -15/-20 dB en début de cycle à -6/-8 dB en fin de cycle. Le signal sature vers 80-100 jours après semis (Figure 37), pour une hauteur de 80 cm (Figure 38) et une biomasse humide de 2000 à 2500 g/m² (Figure 39). Ce seuil correspond au début du stade reproductif lorsque les organes végétatifs de la plante cessent de croître et que tout l'assimilat est dirigé vers les organes reproductifs. Comparée à celle des autres types d'occupation du sol, cette forte variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières est remarquable.

Les relations ont été ajustées par des équations polynomiales, pour lesquelles les meilleures corrélations ont été obtenues. La relation entre le σ^0 et la biomasse (Figure 39) est celle qui est le moins affectée par la différence des conditions de croissance du riz à Akita et à Semarang (Ecart type ET < 1,1 dB ; $r^2 = 0,88$). Par contre, la différence entre les deux sites dans la durée de la phase végétative, et donc dans le développement de la plante, est observable lorsque le σ^0 est exprimé en fonction de l'âge (Figure 37) (ET=1,6 dB ; $r^2=0,82$). Le plateau est atteint vers 80 jours pour les variétés tropicales et 100 jours pour les variétés tempérées.



ERS :

f = 23,5 GHz (Bande C)

p = VV

 $\theta = 23^\circ$

Figure 37 : Variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières

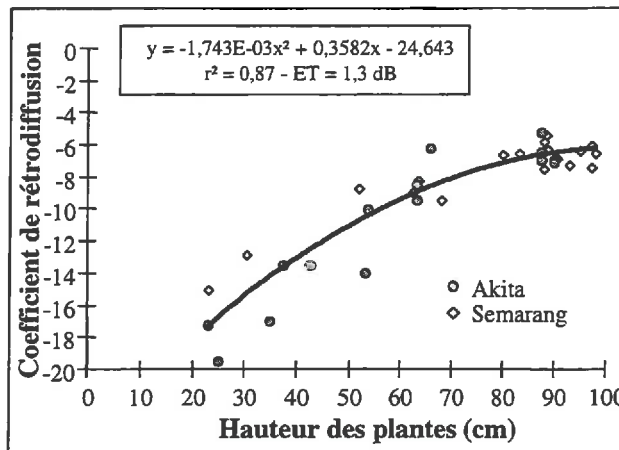


Figure 38 : Variation de la rétrodiffusion des rizières en fonction de la hauteur des plantes

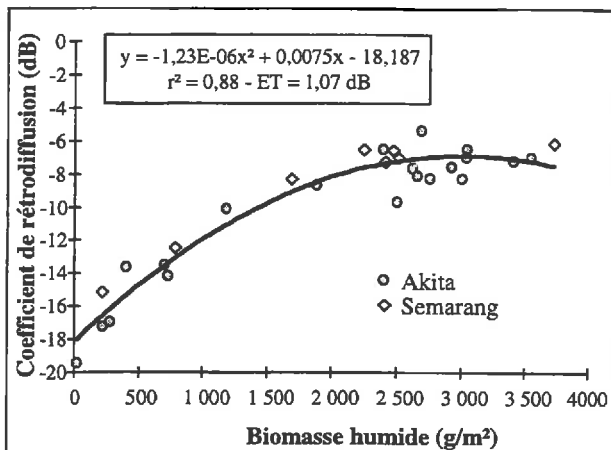


Figure 39 : Variation de la rétrodiffusion des rizières en fonction de la biomasse humide

2- Une très grande variabilité spatiale

Dans une région donnée, la variation de la réponse radar d'un champ à un autre peut être très importante. En raison de nombreux facteurs tels que la disponibilité en eau ou en main d'oeuvre, le calendrier cultural peut être décalé de 6 à 8 semaines entre les cultures précoces et tardives en milieu tropical et environ 2 semaines en milieu tempéré. Ainsi, les parcelles d'un même site peuvent présenter des cultures à divers stades de croissance. Il en résulte une importante plage des réponses radar (Tableau 5). La Figure 40 présente la simulation de la succession des cultures, réalisée à partir des relations expérimentales établies entre le coefficient de rétrodiffusion et l'âge de la plante (Figure 37) pour le site de Semarang,

Field n°	16/02/94 (dB)	06/03/94 (dB)
1	-6.72	-12.71
2	-7.03	-8.22
3	-7.29	-13.91
4	-6.41	-15.10
5	-6.08	-13.13
6	-6.58	-6.36
7	-7.29	-8.89
8	-6.91	-6.91
9	-8.77	-9.46
10	-6.52	-5.40
11	-10.85	-8.96
12	-8.28	-7.50

Tableau 5 : Exemple de valeurs de σ° extraites à 2 dates : 16/02/94 et 06/03/94

pour des champs repiqués à la mi-Novembre et des champs repiqués début Janvier. Ainsi, on peut observer à une date donnée (par exemple au 23 Janvier 94 ou au 06 Mars 94) des différences de plus de 10 dB dans la rétrodiffusion des rizières.

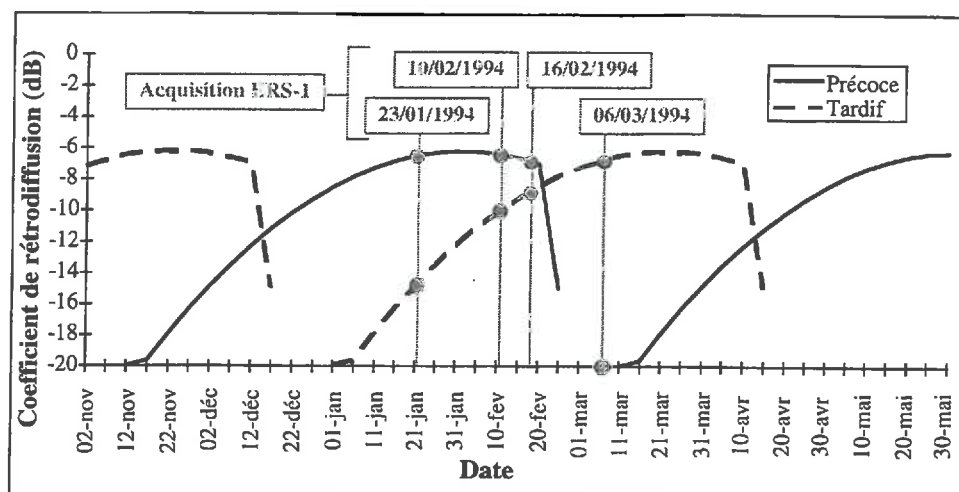


Figure 40 : Simulation de la succession des cultures à Semarang

D'autre part, cette simulation permet de suivre les cycles de croissance des rizières précoces et tardives et d'appréhender la variation des coefficients de rétrodiffusion entre les images. En effet, au 23/01/94, au 10/02/94 et au 16/02/94, les cultures précoces sont en fin de cycle, avec un coefficient de rétrodiffusion qui reste stable. Les cultures tardives présentent quant à elles un σ^0 pouvant progresser de 6 dB entre le 23/01/94 et le 16/02/94. Entre le 16/02/94 et le 06/03/94, les cultures précoces ont été récoltées et leur coefficient de rétrodiffusion chute, alors qu'il continue à progresser pour les cultures tardives.

I-5-3-2 Les données RADARSAT

1- Mode Standard 1 (C-HH-23°) :

Comme pour les données ERS, la Figure 41 montre que le coefficient de rétrodiffusion radar pour les données RADARSAT augmente rapidement jusqu'à un seuil correspondant au stade 80 jours. D'autre part, la variation temporelle de la réponse radar des champs de riz est également importante puisqu'un écart d'au moins 7 dB peut être observé entre le début et la fin du cycle de croissance.

Les relations ont été ajustées par des équations polynomiales, pour lesquelles de bonnes corrélations ont été obtenues. En début de cycle, le coefficient de rétrodiffusion se situe aux alentours de -14/-13 dB et atteint son maximum vers -6 dB. L'importante variation temporelle du signal radar est particulière aux rizières inondées, les autres types d'occupation du sol présentant une variation largement moins forte. Cependant, le niveau de saturation, atteint pour des hauteurs de 60 cm (Figure 41b) et des biomasses de 1500 à 2000 g/m² (Figure 41c), se situe avant le début du

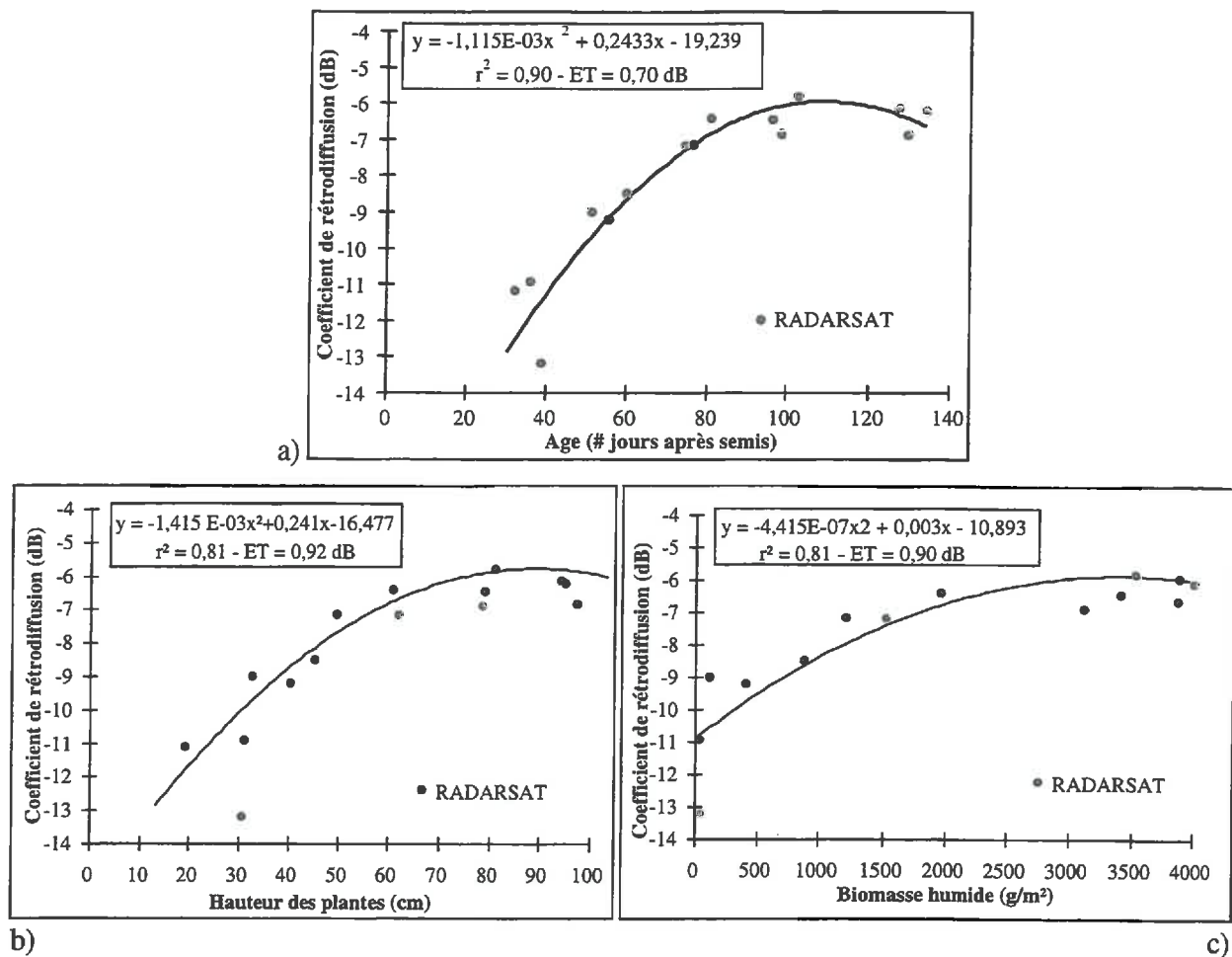


Figure 41 : Variation du σ° en fonction (a) du nombre de jours après semis, (b) de la hauteur des plantes, (c) de la biomasse des plantes (RADARSAT, mode S1 : C-HH-23°)

stade reproductif. En effet, le stade reproductif débute vers 100 jours après semis, pour des plantes mesurant environ 80 cm et ayant une biomasse humide d'environ 2500 g/m^2 . La dispersion des données est de l'ordre de 1 à 2 dB autour de la courbe théorique pour les 3 paramètres : âge, hauteur et biomasse. Les sources de variation sont identiques à celles décrites pour les données ERS.

La comparaison de l'évolution temporelle des données RADARSAT à celle obtenue pour les données ERS (Figure 42 et Figure 43), montre que l'amplitude de variation du σ° est plus faible en polarisation HH qu'en polarisation VV. En début de cycle la rétrodiffusion est plus élevée pour

Configuration	C-HH (dB)	C-VV (dB)	L-HH (dB)	L-VV (dB)
Date	07/10/94	10/10/94	08/10/94	10/10/94
Champ 1	-11,34	-17,60	-12,00	-18,83
Champ 2	-11,07	-17,66	-12,37	-18,53
Champ 3	-11,93	-17,67	-12,25	-19,07
Champ 4	-11,71	-19,41	-12,87	-19,07

Tableau 6 : Valeurs du σ°_{HH} et σ°_{VV} de champs en début de cycle (données SIR-C, $\theta=46^\circ$) pour les bandes C et L.

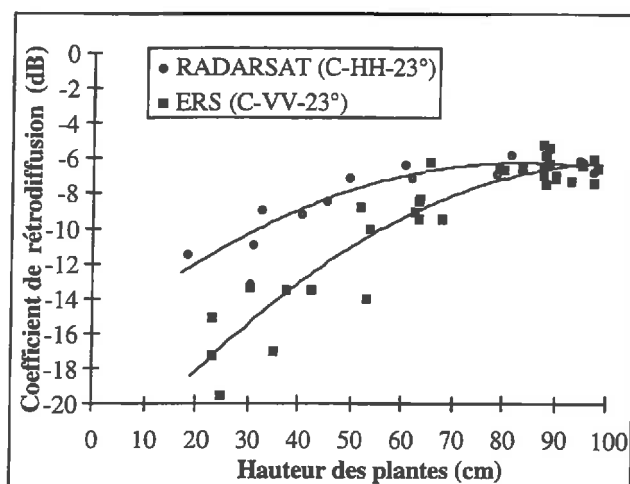


Figure 42 : Evolution du σ^0 du riz en fonction de la hauteur pour ERS et RADARSAT

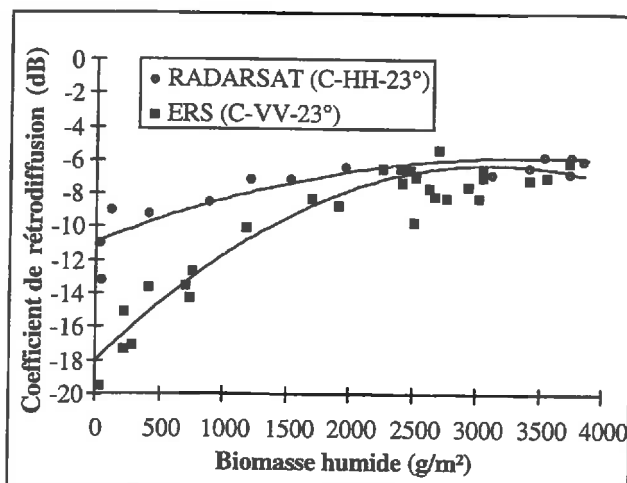


Figure 43 : Evolution du σ^0 du riz en fonction de la biomasse pour ERS et RADARSAT

les données RADARSAT que pour les données ERS (plus de 4 dB de différence). Les rétrodiffusions des deux capteurs se rejoignent en fin de cycle vers -6 dB. Les deux jeux de données n'ayant pas été acquis sur le même site ni à la même période, des différences de techniques culturales, ou conditions climatiques peuvent être responsables de ces différences. Cependant, des différences dues à la polarisation ont été relevées par Le Toan et al. (1989), ainsi que par Mohan et al. (1992) avec des données de capteurs aéroportés polarimétriques. De même, les résultats de la campagne du capteur SIR-C (multi-incidence, multi-polarisation, multi-fréquence) d'Octobre 1994, sur le site de Semarang (Tableau 6), confirment ces valeurs de rétrodiffusion pour des rizières en début de cycle.

Ces informations montrent que la rétrodiffusion RADARSAT des champs de riz est aussi caractérisée par une forte variation temporelle. Cependant le niveau de saturation de cette rétrodiffusion étant atteint avant le début du stade reproductif, il sera plus difficile de déterminer le stade de développement de la plante à l'aide des données RADARSAT qu'à l'aide des données ERS.

Dans la région de Jatisari la variation spatiale de la réponse radar d'un groupe de champs (Golongan) à l'autre peut être également très importante. En raison de la date de mise en eau, le calendrier culturel du premier au dernier Golongan est décalé de 6 semaines. Ainsi, les parcelles de riz appartenant à des Golongan différents présentent des cultures à divers stades de croissance. Il en résulte une importante plage des réponses radar. En reprenant la courbe expérimentale du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'âge (Figure 41a), il est possible de retrouver et expliquer ces disparités (Figure 44).

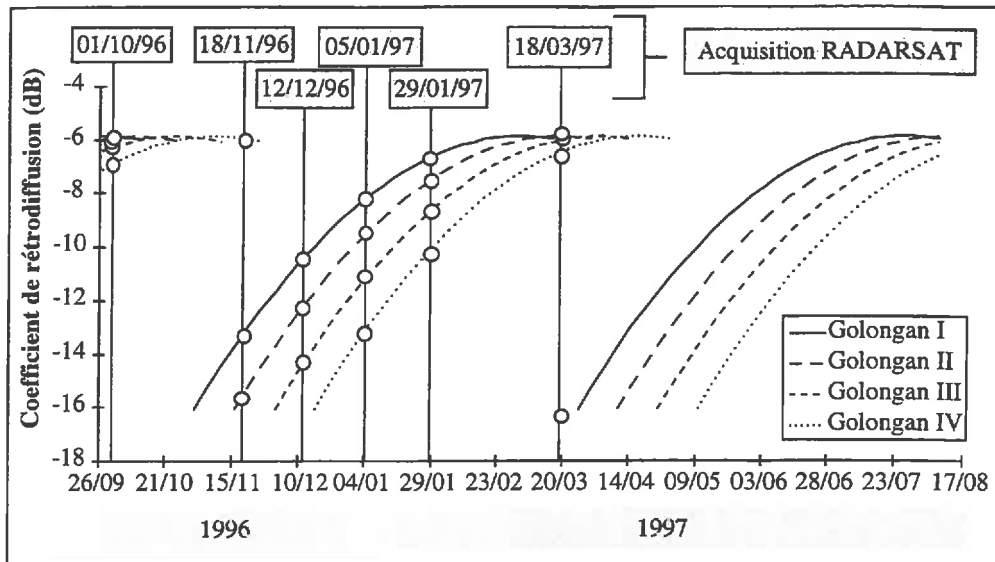


Figure 44 : Simulation de la succession des cultures de riz pour le site de Jatisari

Ainsi, au 18/11/96 ou au 18/03/97, les rizières peuvent présenter des valeurs de rétrodiffusion variant de -14 dB en début de cycle de croissance à -6 dB en fin de cycle. Les rizières présentent cependant la même réponse au 01/10/96, car elles sont toutes en fin de cycle avec une rétrodiffusion d'environ -6 dB. A partir du 18/11/96, les champs appartenant aux Golongan I et II sont en début d'un nouveau cycle avec un σ^0 faible (environ -15 dB), alors que les champs des Golongan III et IV sont encore en fin de cycle. Les champs du Golongan III sont inondés pour un nouveau cycle vers le 12/12/96 et ceux du Golongan IV vers le 05/01/97.

2- Mode Fin 3 (C-HH-43°) :

La Figure 45 montre que le coefficient de rétrodiffusion radar des rizières a une variation temporelle beaucoup moins importante pour un angle d'incidence de 43° que pour un angle d'incidence de 23°. En effet, en début de cycle le σ^0 pour les données F3 à 43° est le même que celui des données S1 à 23°, et ce, jusqu'à environ 60 jours. Après ce stade, le σ^0 à 43° atteint un palier (à -8/-9 dB) alors que le

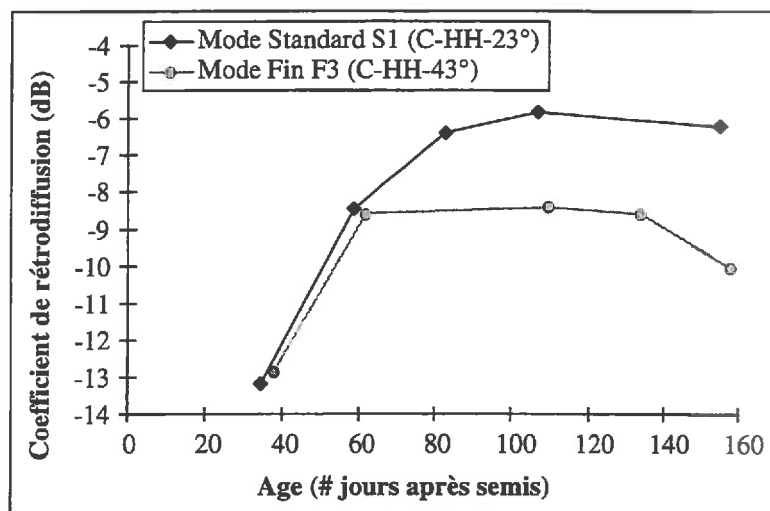


Figure 45 : Comparaison de la rétrodiffusion du riz pour les modes S1 ($\theta=23^\circ$) et F3 ($\theta=43^\circ$) de RADARSAT

σ° à 23° continue de croître jusqu'à environ -6 dB. De nouvelles données RADARSAT (modes Standards S1 à S7) ont confirmé ces résultats (Tableau 7).

Mode (°)	S7 (46,90°) dB	S3 (34,02°) dB	S6 (44,10°) dB	S1 (23,08°) dB
Date	10/04/98	13/04/98	14/06/98	17/06/98
Champ 1	-10,09	-6,86		
Champ 2	-9,67	-6,84		
Champ 3			-9,51	-5,77
Champ 4			-10,04	-6,82

Tableau 7 : Valeurs de σ° (dB) de rizières en fin de cycle, obtenues à partir des données multi-incidence (modes Standards 1 à 7) de RADARSAT (Jatisari)

La variation temporelle des données C-HH 43° étant moins importante que celle des données C-HH 23°, le mode Fin F3 semble moins adapté que le mode Standard S1 pour la caractérisation des rizières.

1-5-3-3 Cas du capteur JERS (L-HH-35°)

En 1995, Rosenqvist et Oguma (Figure 46) ont mené une étude sur le suivi des rizières à l'aide des données du satellite JERS-1, sur un site en Malaisie péninsulaire, où les champs de riz sont plantés de façon manuelle et un site au Japon (Niigata), où les méthodes culturales sont fortement mécanisées avec des champs plantés en rangées selon des directions et des espacements stricts.

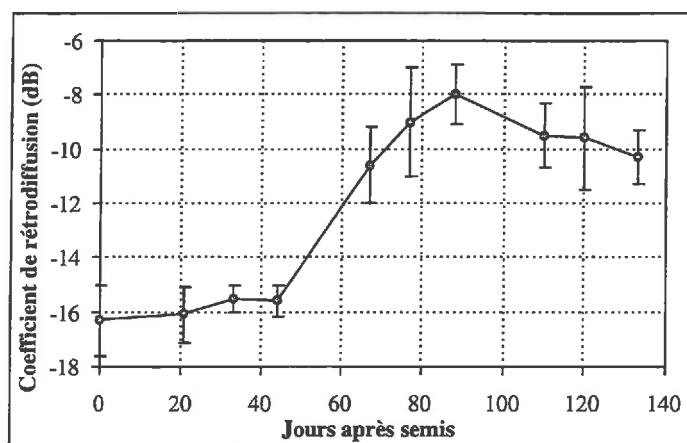


Figure 46 : Variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières à l'aide des données JERS-1 (bande L) acquises en Malaisie (d'après Rosenqvist et Oguma, 1995)

En Malaisie, les rizières présentent toutes une croissance semblable avec une rétrodiffusion variant de -16 dB en début de cycle à -8 dB en fin de cycle. La croissance des rizières en bande L est légèrement différente de celle observée en bande C. Jusqu'à 40-45 jours, la rétrodiffusion reste assez stable (une croissance de 1 dB seulement). Ensuite, la rétrodiffusion augmente très rapidement jusqu'au stade 100 jours après semis (début du stade reproductif), puis, durant la maturation, la rétrodiffusion chute légèrement.

Au contraire, au Japon, selon les directions de plantation, la rétro-diffusion des champs de riz présente des caractéristiques très différentes (Figure 47). Une dynamique de 12 dB entre le début et la fin du cycle a été observée pour les champs plantés dans la direction de visée, alors que les champs plantés dans la direction perpendiculaire ne présentent qu'une dynamique de 6 dB, et les champs plantés dans d'autres directions, une dynamique de 3 dB. Kurosu et al. (1995) qui ont mené des travaux au Japon sur le site d'Akita où les champs sont également plantés de façon mécanique, n'ont rien observé de tel avec les données du satellite ERS (bande C).

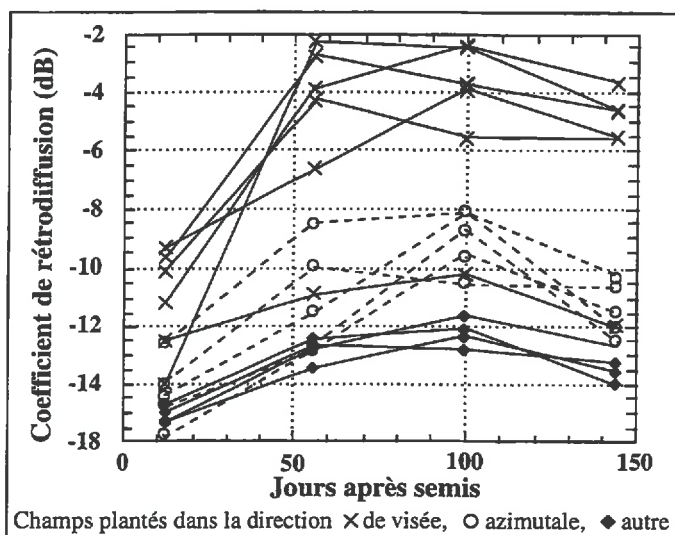


Figure 47 : Variation temporelle du σ^0 de rizières plantées selon des directions de rangée différentes (d'après Rosenqvist et Oguma, 1995)

Ainsi, la direction de plantation influe de façon très importante sur le niveau et la variation de la rétrodiffusion des rizières en bande L.

II - INTERPRETATION PHYSIQUE

L'interprétation physique des résultats de l'analyse expérimentale nous paraît nécessaire pour bien comprendre et quantifier les phénomènes physiques responsables de la réponse radar des rizières. Ainsi, il sera possible de généraliser et étendre les résultats à d'autres pratiques culturales et d'autres environnements rizicoles, afin de développer des méthodes robustes, non spécifiques à un site donné.

II-1 Modélisation théorique

L'intensité de l'énergie rétrodiffusée par une cible (σ^0) dépend de la manière dont l'onde radar interagit avec la surface. Elle est fonction de plusieurs variables ou paramètres qui sont d'une part, les caractéristiques des systèmes radars (fréquence, polarisation, angle d'incidence) et d'autre part, les caractéristiques de la surface étudiée (propriétés géométriques et diélectriques).

L'onde radar ayant la capacité de pénétrer dans le milieu végétal, la puissance rétrodiffusée par un couvert végétal peut résulter de la combinaison de plusieurs composantes : la contribution de la végétation propre (diffusion de volume), la contribution du sol atténuée par la couche végétale (diffusion de surface), et l'interaction entre la surface et la végétation (Figure 48). La surface sous-jacente est caractérisée par sa rugosité et son humidité. Dans le cas des rizières inondées, le sol étant recouvert d'une couche d'eau durant la majeure partie du cycle de croissance, la surface peut être assimilée à une couche d'eau, le plus souvent peu perturbée par le vent, et donc à une surface lisse. Pour une surface lisse, la réflexion est spéculaire et donc la rétrodiffusion dans la direction du radar nulle [a]. La diffusion de la végétation propre [b] résulte de l'interaction de l'onde avec les

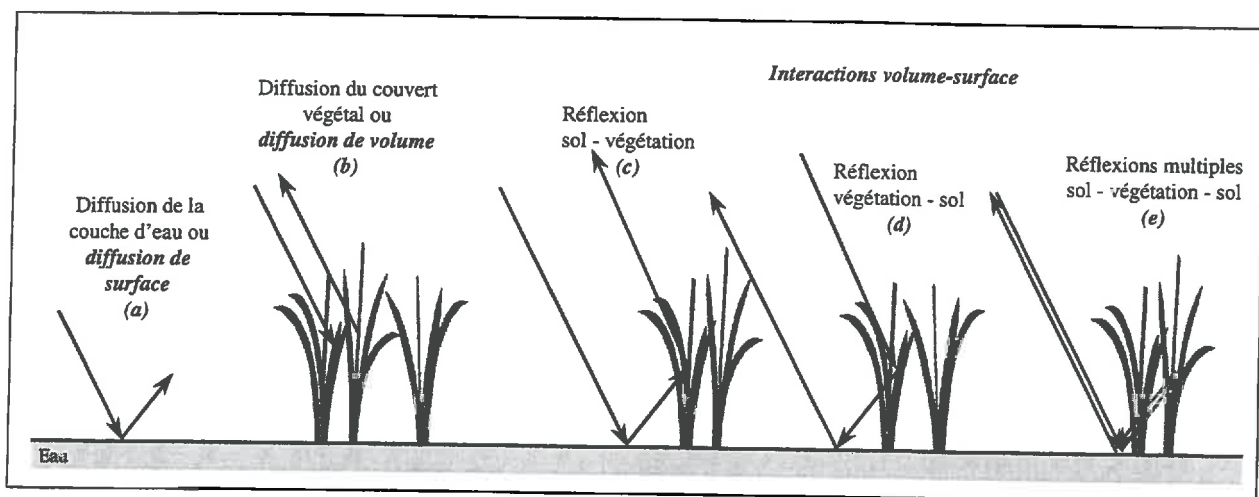


Figure 48 : Les différentes composantes du signal radar rétrodiffusé par une rizière

différents diffuseurs du milieu tels que les feuilles ou les tiges. Selon la profondeur de pénétration de l'onde dans le milieu végétal, le signal rétrodiffusé peut aussi provenir de l'interaction entre ces différents éléments et la surface d'eau [c] et [d], ou encore d'interactions multiples entre la surface d'eau et la végétation [e].

II -1-1 Description du modèle MIT/CESBIO

Afin de comprendre de façon quantitative le comportement de la rétrodiffusion radar des rizières pour différentes configurations, un modèle théorique de rétrodiffusion des champs de riz a été développé par le Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, en collaboration avec le Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère.

Lors d'une première approche de modélisation des rizières (Le Toan et al., 1989), les plantes de riz ont été assimilées à de fins cylindres diélectriques disposés sur une surface rugueuse et l'équation du transfert radiatif du premier ordre était alors utilisée pour obtenir le coefficient de rétrodiffusion.

Le modèle du MIT/CESBIO est basé sur une description plus réaliste des champs de riz, issue des observations détaillées réalisées dans le cadre de ce travail. La rétrodiffusion de la couche de riz est calculée en réalisant des simulations de Monte Carlo de diffusion de cylindres et de disques elliptiques diélectriques au-dessus d'un demi-espace diélectrique en utilisant les équations de diffusion multiple de Foldy-Lax (Tsang et al., 1995). Le modèle considère aussi les phénomènes de cohérence et d'agrégation des diffuseurs.

Les plantes sont plantées par touffes régulièrement espacées, comme observé sur les sites de Jatisari, Akita et Semarang, sur une surface carrée A (Figure 49). De petites variations dans la distance entre les touffes sont également prises en compte. Chaque touffe comprend un ensemble N_s de tiges représentées par des cylindres diélectriques avec une hauteur h , un rayon a , une constante diélectrique ϵ_s et une inclinaison maximale θ_{ms} . Chaque tige de riz possède N_l feuilles ayant la forme de disques elliptiques avec une longueur l , une largeur w , une épaisseur d , une constante diélectrique complexe ϵ_l et une inclinaison maximale θ_{ml} . Au sein d'une touffe de riz, les tiges sont placées de manière uniforme et de façon

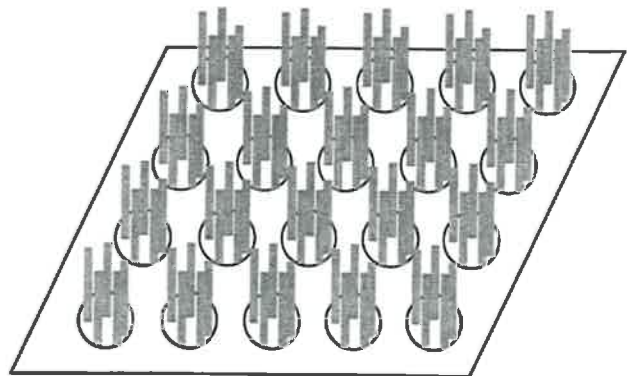


Figure 49 : Description du champ de riz par le modèle de riz MIT/CESBIO

aléatoire à l'intérieur d'un cercle de rayon a_c (Tsang et al., 1995). Il y a N_c touffes et donc le nombre total de tiges est $N_c \times N_s$ et le nombre total de feuille est $N_c \times N_s \times N_l$ au sein de la canopée du riz. Le demi-espace inférieur correspond à de l'eau avec une constante diélectrique complexe ϵ_l .

Considérons une configuration de rizière pour laquelle le sommet de la couche de riz est indiqué par $z = 0$ et le contact entre la couche de riz et la couche d'eau est $z = -h$ (Figure 50).

Pour une onde incidente \bar{E}^i dans la direction (θ_i, ϕ_i) , la solution du premier ordre du champ électrique rétrodiffusé peut être exprimée de la façon suivante (9):

$$\begin{aligned}
 E_q^s(\bar{r}) = & \frac{e^{ikr}}{r} \sum_{\substack{t=\text{stem} \\ \text{or leaf}}} \sum_{j=1}^{N_t} \left[f_{qp}^t(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i; \theta_i, \phi_i) e^{i[\bar{k}_p^i(\theta_i, \phi_i) - \bar{k}_q^s(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i)] \cdot \bar{r}_j^t} \right. \\
 & + R_q(\theta_i) f_{qp}^t(\theta_i, \pi + \phi_i; \theta_i, \phi_i) e^{i[\bar{k}_p^i(\theta_i, \phi_i) - \bar{k}_q^s(\theta_i, \pi + \phi_i)] \cdot \bar{r}_j^t} \\
 & + f_{qp}^t(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i; \pi - \theta_i, \phi_i) R_p(\theta_i) e^{i[\bar{k}_p^i(\pi - \theta_i, \phi_i) - \bar{k}_q^s(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i)] \cdot \bar{r}_j^t} \\
 & \left. + R_q(\theta_i) f_{qp}^t(\theta_i, \pi + \phi_i; \pi - \theta_i, \phi_i) R_p(\theta_i) e^{i[\bar{k}_p^i(\pi - \theta_i, \phi_i) - \bar{k}_q^s(\theta_i, \pi + \phi_i)] \cdot \bar{r}_j^t} \right] E_p^i
 \end{aligned} \quad (9)$$

où t est l'indice correspondant à la catégorie du diffuseur : tige ou feuille, ainsi, N_t est $N_c \times N_s$ pour les tiges et $N_c \times N_s \times N_l$ pour les feuilles. f_{qp}^t est l'élément de la matrice de diffusion pour lequel q et p sont les composantes polarisées ($q, p = h$ ou v) de l'onde diffusée ou incidente. \bar{k}_p^i est le vecteur de propagation de l'onde incidente et \bar{k}_p^s , le vecteur de propagation du champ rétrodiffusé (Figure 50). $\bar{r}_j^t = \hat{x}x_j^t + \hat{y}y_j^t - \hat{z}z_j^t$ correspond à l'emplacement de l'élément j de la catégorie t , et $R_p(\theta_i)$ et $R_q(\theta_i)$ sont les coefficients de Fresnel. L'approximation des cylindres finis est appliquée pour le calcul de la rétrodiffusion des tiges (Karam et al., 1988). Elle considère que le courant induit dans les cylindres diélectriques est supposé être le même que

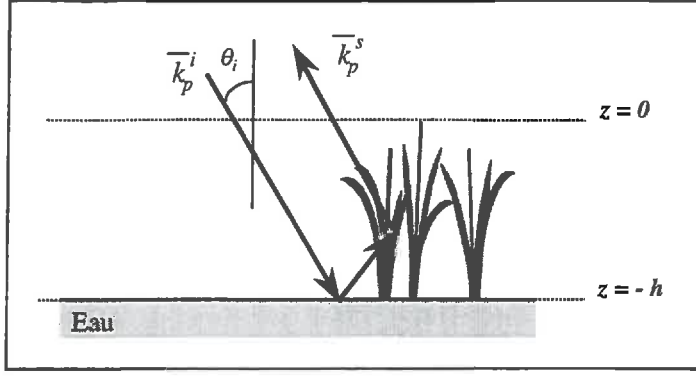


Figure 50 : Configuration du modèle de riz MIT/CESBIO

celui induit dans de longs cylindres infinis de même rayon. L'approximation de l'optique physique pour les disques elliptiques est utilisée pour le calcul de la rétrodiffusion des feuilles (Le Vine et al., 1985). La solution du premier ordre dans (9) est décrite par 4 mécanismes de diffusion majeurs dans une couche de riz (Figure 48).

Le premier terme de l'équation est la diffusion directe par les diffuseurs (Figure 48 [b]). Le second terme est une diffusion simple des diffuseurs, suivie par une réflexion entre les diffuseurs et la surface d'eau (Figure 48 [c]). Le troisième terme est l'opposé du précédent (Figure 48 [d]). Et le quatrième terme décrit la réflexion par l'eau suivie par une diffusion simple des diffuseurs suivie à nouveau par une réflexion de la surface (Figure 48 [e]). L'effet de l'atténuation introduite par la couche sur la propagation de l'onde est prise en compte par l'approximation de Foldy (Yueh et al., 1992). Deux ondes caractéristiques se propagent le long de la direction (θ, ϕ) à l'intérieur de la couche de riz avec les constantes de propagation (10) et (11) :

$$k_h = k_0 - iM_{hh} \quad (10)$$

$$k_v = k_0 - iM_{vv} \quad (11)$$

pour, respectivement, les composantes polarisées horizontalement et verticalement. Dans (10) et (11),

$$M_{qp} = \frac{i2\pi}{k_0} \frac{N_c N_s}{Ah} (\langle f_{qp}^{tige}(\theta, \phi; \theta, \phi) \rangle + N_l \langle f_{qp}^{feuille}(\theta, \phi; \theta, \phi) \rangle) \quad (12)$$

où $\langle \rangle$ désigne la moyenne sur l'ensemble des configurations, h est la hauteur de la couche végétale, et k_0 est le nombre d'ondes dans l'espace libre. Comme les valeurs de k_h et k_v sont assez proches de celles de k_0 , les effets de réflexion et de réfraction au sommet de la couche de riz sont négligés. Basée sur les équations (10) et (11), l'équation (9) devient (13) :

$$\begin{aligned}
E_q^s(\bar{r}) = & \frac{e^{ikr}}{r} \sum_{\substack{t=\text{stem} \\ \text{or leaf}}} \sum_{j=1}^{N_t} \left[f_{qp}^t(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i; \theta_i, \phi_i) e^{-M_{qq} \frac{z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{-M_{pp} \frac{z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j^t + k_y^i y_j^t + k_z^i z_j^t)} \right. \\
& + R_q(\theta_i) f_{qp}^t(\theta_i, \pi + \phi_i; \theta_i, \phi_i) e^{M_{qq} \frac{2h+z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{-M_{pp} \frac{z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j^t + k_y^i y_j^t + k_z^i h)} \\
& + f_{qp}^t(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i; \pi - \theta_i, \phi_i) R_p(\theta_i) e^{-M_{qq} \frac{z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{M_{pp} \frac{2h+z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j^t + k_y^i y_j^t + k_z^i h)} \\
& \left. + R_q(\theta_i) f_{qp}^t(\theta_i, \pi + \phi_i; \pi - \theta_i, \phi_i) R_p(\theta_i) e^{M_{qq} \frac{2h+z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{M_{pp} \frac{2h+z_j^t}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j^t + k_y^i y_j^t + k_z^i (2h+z_j^t))} \right] E_p^i
\end{aligned} \quad (13)$$

où $k_x^i = k_0 \sin \theta_i \cos \phi_i$, $k_y^i = k_0 \sin \theta_i \sin \phi_i$, et $k_z^i = k_0 \cos \theta_i$. L'atténuation vient de la partie réelle de M_{pp} et M_{qq} . La rétrodiffusion de la couche de riz est calculée par des simulations de Monte-Carlo. Pour chaque réalisation de champs de riz, la position des N_c touffes de riz est d'abord calculée, puis la position des N_s tiges au sein de chaque touffe est générée en utilisant un générateur de nombres aléatoires avec une distribution uniforme. La position des tiges de riz est vérifiée de façon à ce qu'il n'y ait pas de recouvrement entre les tiges. La position et l'orientation des feuilles fixées sur chaque tige sont également générées de façon aléatoire. Le champ électrique diffusé E_s pour chaque réalisation est calculé selon l'équation (13). Le coefficient de rétrodiffusion est ensuite généré selon (14) :

$$\sigma_{qp}^\circ = \frac{4\pi r^2}{A} \frac{\langle |E_q^s|^2 \rangle}{|E_p^i|^2} \quad (14)$$

avec A = surface illuminée.

Les résultats sont obtenus en moyennant un ensemble de 50 réalisations. Ce nombre tient compte des temps de calcul et de la convergence des résultats.

II -1-2 Les paramètres du modèle

Les paramètres utilisés pour le calcul du coefficient de rétrodiffusion des champs de riz des sites de Semarang et de Jatisari sont résumés, respectivement, dans le Tableau 8 et le Tableau 9. Les paramètres d'entrée du modèle sont déduits des mesures de terrain ou tirés de la littérature telles que IRRI, 1993.

- La hauteur des plantes, la teneur en eau des plantes, l'épaisseur et la longueur des feuilles sont les moyennes des données expérimentales. L'écart-type est calculé en faisant l'hypothèse d'une distribution normale des paramètres.
- Le rayon des tiges, le nombre de tiges par touffe, le nombre de touffes par m², le nombre de feuilles par tige, l'épaisseur des feuilles, l'angle d'inclinaison des tiges et des feuilles sont déduits de mesures sur le terrain, validées ou complétés par la littérature (Dobelmann, 1976 et Huet, 1983).
- La constante diélectrique de la couche de riz est calculée à partir de la teneur en eau de la plante selon la formule donnée par Ulaby et El-Rays, 1987.
- La constante diélectrique de la surface d'eau est $\epsilon_1 = (74, 21)$ à 5,3 GHz et pour 20° C (Ulaby et al., 1986).

Age (days)	20	40	60	80	100
Hauteur h (cm)	20	35	50	68.4	76.7
Rayon des tiges a (cm)	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
# touffes per m ² N_c/A (m ⁻²)	20	20	20	20	20
Teneur en eau gravimétrique	0,7	0,72	0,74	0,71	0,71
Largeur des feuilles w (cm)	0,41	0,74	0,98	1,15	1,24
Longueur des feuilles l (cm)	14,1	24,7	31,9	35,7	36,0
Epaisseur des feuilles d (cm)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
# feuilles per tiges N_l	5	7	7	7	7
Angle d'inclinaison Max des tiges θ_{ms} (deg)	0	0	0	5	10
Angle d'inclin. Max des feuilles θ_{ml} (deg)	5	10	20	30	40

Tableau 8 : Paramètres d'entrée pour le modèle théorique de rétrodiffusion des rizières du site de Semarang

Age (days)	20	40	60	80	100
Hauteur h (cm)	20	35	45	60	80
Rayon des tiges a (cm)	0,11	0,18	0,21	0,27	0,29
# touffes per m^2 N_c/A (m^{-2})	16	16	16	16	16
Teneur en eau gravimétrique	0,78	0,79	0,74	0,72	0,71
Largeur des feuilles w (cm)	0,50	0,70	0,99	1,17	1,30
Longueur des feuilles l (cm)	14	24	31	37	41
Epaisseur des feuilles d (cm)	0,017	0,025	0,028	0,032	0,036
# feuilles per tiges N_l	3	3	4	5	5
Angle d'inclinaison Max des tiges θ_{ms} (deg)	0	0	10	12	15
Angle d'inclin. Max des feuilles θ_{ml} (deg)	5	15	20	25	30

Tableau 9 : Paramètres d'entrée pour le modèle théorique de rétrodiffusion des rizières du site de Jatisari

II -2 Interprétation des résultats expérimentaux et simulations

Le modèle théorique a été utilisé pour interpréter les observations réalisées lors de l'étude expérimentale et pour simuler différentes conditions de culture.

II -2-1 Variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières

Le modèle a d'abord permis d'interpréter la forte variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières. La Figure 51 présente le résultat de la comparaison entre le modèle théorique et les données expérimentales. Le coefficient de rétrodiffusion théorique est calculé à 5,3 GHz, pour une polarisation VV, et 23° d'incidence. L'effet de la variation de l'angle d'incidence sur la largeur de l'image (de 20,6° à 26°) sur le σ^0 est négligeable. Les données

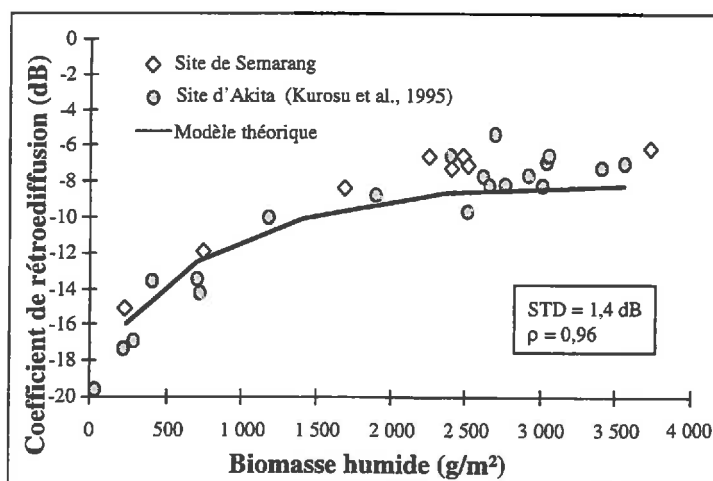


Figure 51 : Comparaison entre le modèle théorique de rétrodiffusion des rizières et les données expérimentales

expérimentales correspondent aux mesures faites sur les sites de Semarang et d'Akita, exprimées en fonction de la biomasse de la plante.

Une bonne concordance est obtenue entre le modèle et les observations (Figure 51). La croissance de la réponse radar est bien décrite par les résultats du modèle. Cependant, les valeurs calculées du coefficient de rétrodiffusion sous-estiment légèrement les mesures durant la phase reproductive (biomasse > 2000 g/m²). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le modèle ne prend pas en compte la présence de la panicule durant la phase reproductive, ou que certains paramètres importants (diamètre des tiges) sont sous-estimés en fin de cycle.

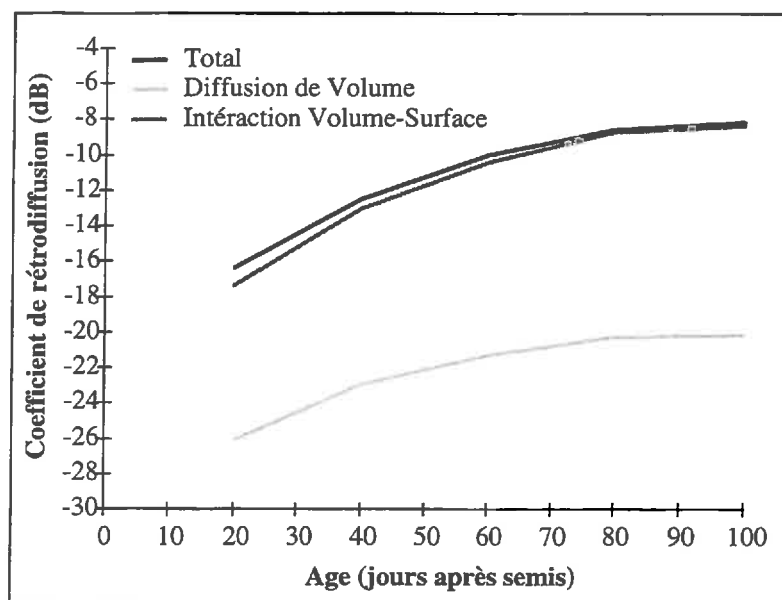


Figure 52 : Détermination de la contribution des différents mécanismes de diffusion

La décomposition des sorties du modèle en différents mécanismes de diffusion (Figure 52) montre que la rétrodiffusion des rizières résulte principalement de l'interaction entre l'onde, la végétation et l'eau (Figure 48 [c] et [d]). La diffusion de volume directe (Figure 48 [b]) est négligeable (inférieure à -20 dB), tout comme les interactions multiples (Figure 48 [e]).

Les données expérimentales et la modélisation concernent la période de croissance végétative de la plante (entre 20 et 100 jours). Durant celle-ci, la variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières peut donc être comprise et expliquée de la manière suivante : durant la phase végétative, la plante croît progressivement jusqu'à atteindre sa hauteur maximale. Durant cette période, les champs restent inondés, l'eau pouvant atteindre le tiers de la hauteur de la plante jusqu'au début du tallage. Le modèle montre que l'interaction entre l'onde, la plante, et l'eau (Figure 48 [c] et [d]) est le phénomène prépondérant. Cette interaction est représentée par les 2^{ème} et 3^{ème} termes de l'équation (13). Le calcul théorique montre que la partie diffusion dans ces termes augmente plus rapidement que la partie atténuation. Il en résulte que l'interaction augmente avec le volume des diffuseurs de la couche végétale, et donc avec la croissance des plantes.

Les données radar n'ont pas permis d'acquérir des observations en dehors de la période de croissance végétative du riz. La rétrodiffusion des rizières peut cependant être prévue qualitativement de la manière suivante : au moment du semis ou du repiquage, les sols sont inondés sous 3 à 15 cm. La réponse radar résulte donc principalement d'une contribution de la surface d'eau (Figure 48 [a]). La réflexion de l'onde est spéculaire et le signal retourné est très faible. L'effet possible du vent sur la couche d'eau, qui devient alors rugueuse, peut cependant modifier de façon importante la valeur de la rétrodiffusion radar. Lors de la phase reproductive, l'atténuation doit atteindre son maximum et la diffusion atteint sa valeur de saturation. A la récolte, le champ est drainé et la végétation est coupée. Il en résulte une chute brutale du coefficient de rétrodiffusion. Enfin, après la récolte, les valeurs des réponses radar sont variables, en fonction de l'humidité du sol.

Le modèle a été utilisé dans un deuxième temps pour simuler la rétrodiffusion radar pour différentes conditions de croissance du riz. La Figure 53 présente les résultats de la simulation lorsque le σ^0 est exprimé en fonction de l'âge (a) et de la hauteur des plantes (b), pour deux cycles de croissance : cycle court (Semarang), cycle long (Akita). Le jeu de données utilisé pour la simulation tient compte du délai dans les conditions de croissance durant le cycle végétatif du riz à cycle court, comparé à celui à cycle long. Ces résultats peuvent être utilisés pour interpréter les dispersions observées dans la Figure 37 et la Figure 38 durant la phase végétative.

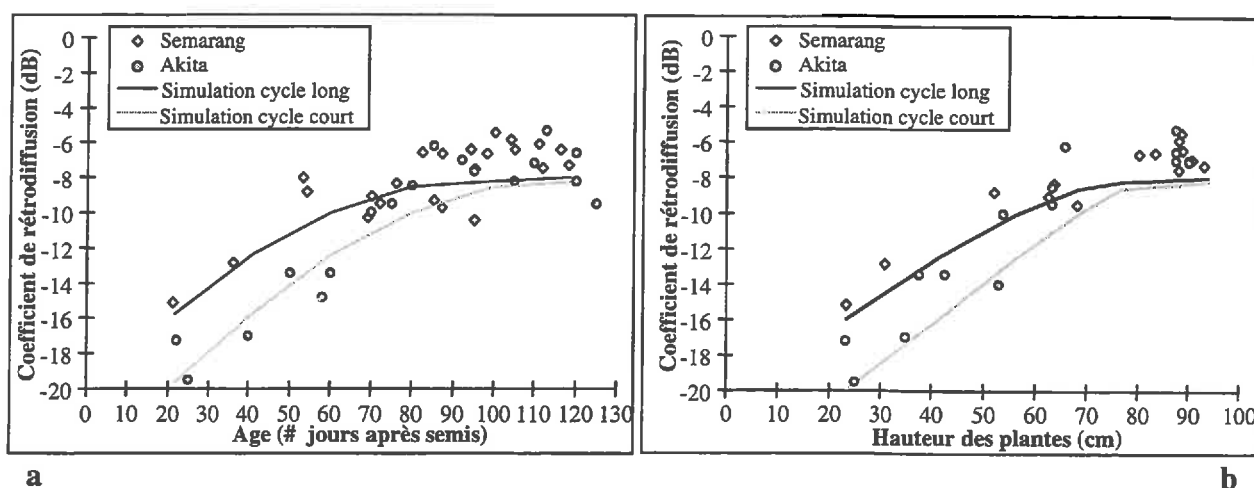


Figure 53 : Simulation théorique des coefficients de rétrodiffusion radar pour des cycles de croissance courts et longs et comparaison avec les données de terrain.

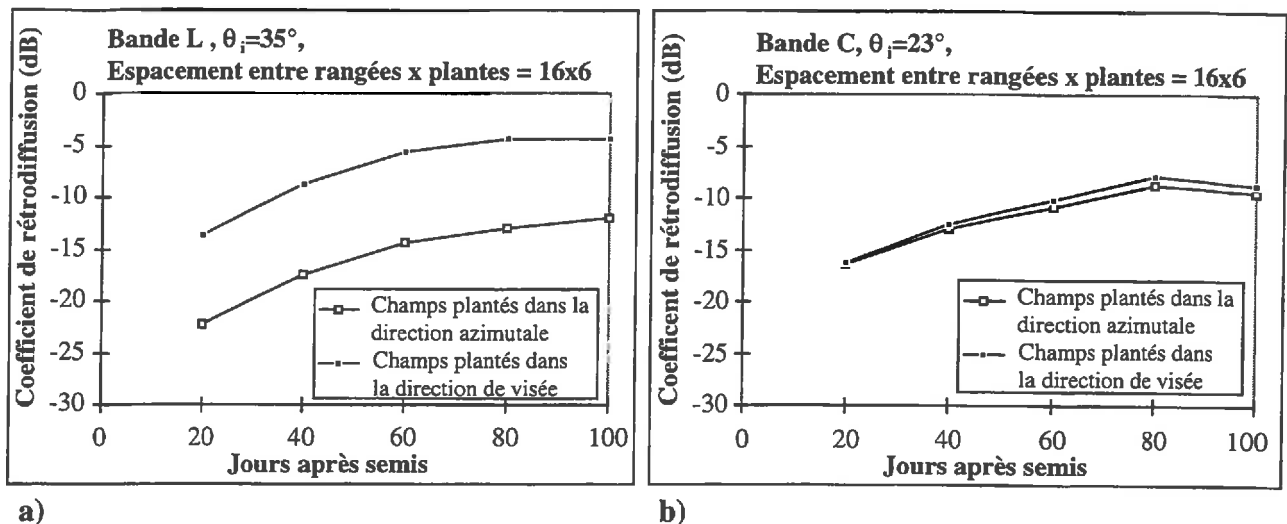


Figure 54 : Simulation de la rétrodiffusion de rizières plantées avec un espacement entre rangées de 16 cm et un espacement entre plantes de 6cm pour la configuration de JERS (a) et de ERS (b).

II -2-2 Effet de la longueur d'onde

L'analyse des données (Figure 46 et Figure 47) a montré que, lorsque les rizières sont plantées mécaniquement en rangées, la direction des rangées affecte le signal en bande L ($\lambda=24$ cm) alors qu'aucune différence n'est observée en bande C ($\lambda=5,3$ cm).

Afin de déterminer si ce phénomène se reproduisait dans d'autres configurations de plantation, plusieurs simulations ont été réalisées pour la configuration JERS-1 et la configuration ERS. Plusieurs couples de distances de plantations (entre rangées et entre plantes) ont été simulés. A titre d'exemple la Figure 54 présente les résultats obtenus pour des espacements entre rangées de 16 cm et des espacements entre plantes de 6 cm. En bande C, les rétrodiffusions présentent le même niveau quelle que soit la direction de plantation des champs (Figure 54b). Au contraire, pour la configuration JERS-1 (bande L), une différence de près de 10 dB apparaît entre les champs plantés dans la direction de visée et ceux plantés dans la direction azimutale (Figure 54a). Dans le premier cas, la rétrodiffusion est très forte et atteint -2 dB pour les stades adultes alors que dans le second cas, la rétrodiffusion est plus basse avec des niveaux de -8 dB en fin de cycle.

La très forte rétrodiffusion des champs plantés dans la direction de visée peut être expliquée par la longueur d'onde comparée à la distance entre les plantes d'une rangée (Rosenqvist, 1998). Généralement, les champs sont plantés avec un espacement entre plantes d'environ 10 à 20 cm. Lorsque les champs sont plantés de façon mécanique avec des espacements très réguliers, le caractère cohérent de l'onde (signal en amplitude et en phase) provoque des phénomènes d'interférences

constructives entre les diffuseurs (rehaussement du signal rétrodiffusé), lorsque la distance entre plantes correspond à un nombre entier de longueur d'onde (15):

$$d = n\lambda \cos(\theta) \quad (15)$$

avec d = distance entre plantes, λ = longueur d'onde, θ = angle d'incidence et $n=1,2,\dots$

Or, en général, il y a toujours de légers décalages dans le positionnement des plantes sur une rangée, caractérisé par un écart-type de l'ordre du cm. En bande C, ce décalage étant de l'ordre de la longueur d'onde, il perturbe de façon suffisante la phase du signal rétrodiffusé par chacun des éléments pour que sommation cohérente et incohérente soient équivalentes. Par contre, en bande L, ce décalage dans la position des plantes est petit devant la longueur d'onde et donc les interférences constructives ou destructives sont en moyenne conservées.

Ainsi, pour les données JERS, lorsque les champs sont plantés dans la direction de visée, et que les distances de plantation remplissent les conditions d'interférences constructives (15), le signal radar rétrodiffusé est fortement rehaussé. Dans le cas où les champs sont plantés dans la direction azimutale (perpendiculaire à la direction de visée), c'est la distance entre rangées qui importe. Si celle-ci ne remplit pas les conditions d'interférences constructives, les champs plantés dans la direction azimutale présenteront une rétrodiffusion plus basse. Il en va de même pour les champs plantés dans des directions autres que la direction de visée ou la direction azimutale (Figure 47). Par contre, les différences de dynamique observées entre les champs plantés dans la direction azimutale et ceux plantés dans des directions autres, n'ont pu être expliquées. Des simulations supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les mécanismes responsables de ce phénomène. Enfin, si l'on considère un champ semé à la volée, les positions des plantes sont aléatoires. Il ne peut donc y avoir d'interférence constructive ou destructive et le phénomène observé en bande L pour les champs semés mécaniquement, n'apparaît plus (Figure 46). En raison de ce phénomène d'interférences, il est impossible de trouver des relations constantes entre la rétrodiffusion observée en bande L et les paramètres des plantes de riz dès lors que les champs sont plantés de façon mécanique, avec un espacement régulier et une direction de rangée marquée. Par contre, pour les champs semés à la volée, il sera possible de déterminer des relations stables entre la rétrodiffusion et la croissance de la plante. Cependant, dans une optique de développement de méthodes applicables à tout site, l'utilisation des données JERS paraît moins adaptée.

D'autre part, l'analyse expérimentale a également montré que l'accroissement du signal en bande L intervenait plus tard qu'en bande C (Figure 46). Ce phénomène peut s'expliquer par la taille relative des diffuseurs comparée à la longueur d'onde. En bande L, la taille effective des

diffuseurs est plus faible, et donc le milieu est effectivement moins dense qu'en bande C. L'accroissement de biomasse n'entraîne donc une augmentation de la rétrodiffusion qu'à partir du stade 50-60 jours, (« plateau de tallage »), pour lequel les touffes couvrent totalement les espaces entre plantes. Ensuite, la croissance du σ^0 en bande L est similaire à celle observée en bande C (Figure 46).

II-2-3 Effet de la polarisation

La polarisation est sensible à la forme et l'orientation des éléments diffuseurs composant la surface ou le milieu observé. Par exemple, une onde polarisée verticalement / horizontalement sera plus atténuée par une cible de structure verticale / horizontale.

La comparaison entre les données en mode Standard 1 ($\theta = 23^\circ$) issues du capteur RADARSAT (bande C - polarisation HH) et celles issues du capteur ERS (bande C - polarisation VV - $\theta = 23^\circ$) a montré que la rétrodiffusion des rizières était sensible à la polarisation de l'onde (Figure 42 et Figure 43). En début de cycle les deux jeux de données sont très différents (σ^0_{HH} supérieur à σ^0_{VV} de plus de 4 dB) pour se rejoindre en fin de cycle.

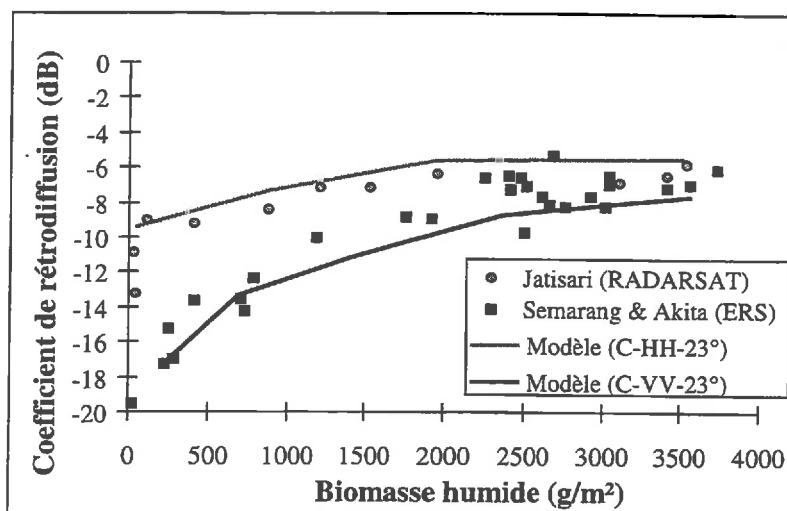


Figure 55 : Simulations théoriques de la rétrodiffusion pour les configurations de RADARSAT et ERS et comparaison avec les mesures expérimentales.

La Figure 55 présente le résultat de la simulation de la rétrodiffusion des rizières de Jatisari pour la configuration RADARSAT en mode Standard S1 (C-HH, 23°) et les rizières de Semarang pour la configuration ERS (C-VV, 23°), exprimée en fonction de la biomasse humide des plantes. On retrouve les phénomènes observés lors de l'étude expérimentale (Figure 43). En début de cycle la rétrodiffusion est beaucoup plus forte en HH qu'en VV, avec près de 6 dB de différence, alors qu'en fin de cycle cette différence est réduite. La comparaison des simulations avec les données de terrain mesurées sur le site de Jatisari pour les données RADARSAT et sur les sites de Semarang et Akita pour les données ERS, donne de bons résultats.

Ce comportement polarisé peut être expliqué par la différence entre les atténuations pour les différentes polarisations, notées M_{pp} et M_{qq} dans l'équation (13). Ainsi, pour un même volume de biomasse, l'atténuation est plus forte en VV qu'en HH en raison de la structure verticale du riz aux jeunes stades (Le Toan et al., 1989). En début de cycle, l'atténuation de l'onde par la plante est supérieure en VV qu'en HH et $\sigma^{\circ}_{ERS} < \sigma^{\circ}_{RADARSAT}$. Puis au fur et à mesure de sa croissance (tiges, feuilles ...), la plante perd sa structure verticale. Ainsi, la différence entre la polarisation horizontale et la polarisation verticale diminue et en fin de cycle, les 2 jeux de données présentent le même niveau de rétrodiffusion (à -6 dB environ), qui résulte de la diffusion et de l'atténuation.

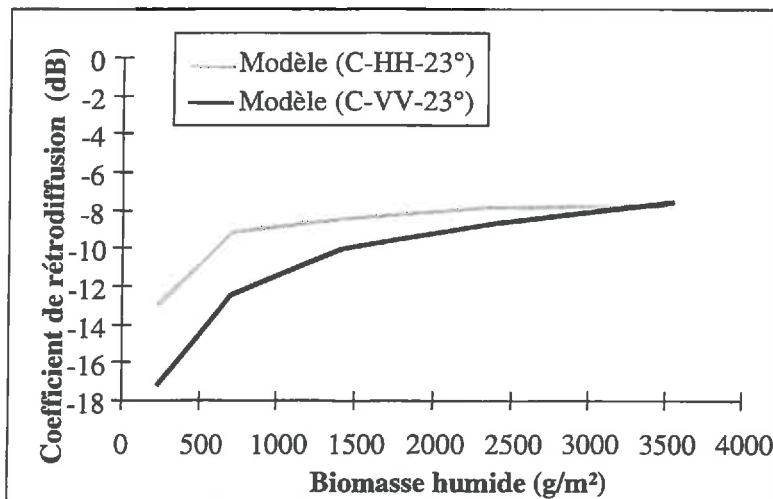


Figure 56 : Simulations théoriques de la rétrodiffusion des rizières pour les configurations C-HH et C-VV 23° pour les paramètres d'entrée du site de Semarang.

De façon à déterminer la différence entre les polarisations pour les mêmes rizières, cultivées dans des conditions identiques, des simulations ont été réalisées pour C-HH 23° et C-VV 23° avec les jeux de paramètres de Semarang (Tableau 8). La Figure 56 présente les résultats de cette simulation. La différence est moins marquée que sur la Figure 55, mais la rétrodiffusion en polarisation HH est toujours supérieure à celle en polarisation

VV au début du cycle (4 dB de différence). Ensuite, au cours de la croissance de la plante, les deux jeux de données se rejoignent, pour atteindre une valeur égale en fin de cycle.

Ceci explique que la dynamique de la variation temporelle en HH (> 6 dB) soit inférieure à celle obtenue en VV (> 10 dB). Elle reste cependant particulièrement forte comparée aux autres types d'occupation du sol, mais l'inversion en paramètres tels que l'âge, la hauteur ou la biomasse sera plus délicat avec les données RADARSAT qu'avec les données ERS.

Ces résultats indiquent qu'il pourra être possible, à partir des données du futur capteur ASAR sur ENVISAT de suivre la croissance des plantes de riz, à partir de leur différence de rétrodiffusion en polarisation HH et en polarisation VV. La Figure 57 montre l'évolution de la différence entre les coefficients de rétrodiffusion théoriques σ°_{HH} et σ°_{VV} en bande C, et pour un angle d'incidence de 23°. La différence entre les deux polarisations varie de plus de 4 dB en début de cycle à 0 dB en fin de cycle. Ce phénomène pourrait être observé pour des plantes ayant une structure verticale, mais seules les

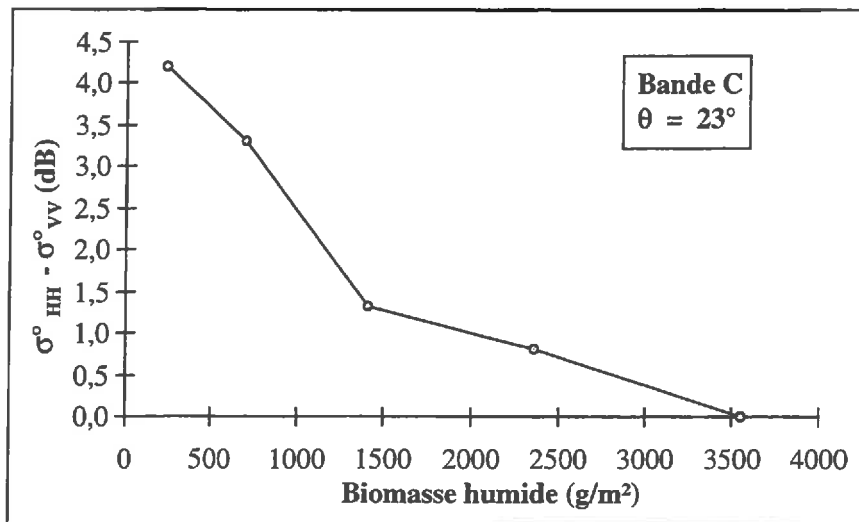


Figure 57 : Evolution de la différence entre les σ_{HH} et σ_{VV} théoriques en fonction de la biomasse des plantes. Les simulations ont été réalisées en bande C et pour un angle d'incidence de 23°

plantes poussant sur une surface d'eau présentent des différences aussi importantes de rétrodiffusion entre la polarisation horizontale et la polarisation verticale. Ainsi, les autres types de surfaces naturelles telles que les forêts ou les cultures, y compris celles présentant une structure verticale telle que les céréales, présenteront une différence de polarisation

inférieure à 1 dB (Le Toan et al., 1989).

Cette différence pourra donc être utilisée pour renforcer la discrimination des rizières aux stades végétatifs des autres types d'occupation du sol, à partir d'acquisitions ENVISAT. D'autre part, cette différence devrait également permettre de suivre la croissance et notamment la biomasse de la plante, jusqu'à 1500-2000 g/m^2 .

II -2-4 Effet de l'angle d'incidence

L'angle d'incidence détermine le parcours de l'onde dans le milieu végétal. La comparaison entre les données du capteur RADARSAT (C-HH) en mode Fin F3 ($\theta=43^\circ$) et en mode Standard S1 ($\theta=23^\circ$) a montré que la rétrodiffusion des rizières variait avec l'angle d'incidence (Figure 45). En effet, alors que les deux jeux de données sont identiques en début de cycle, la saturation apparaît beaucoup plus tôt pour $\theta=43^\circ$ que pour $\theta=23^\circ$ (Figure 45).

La Figure 58 montre le résultat des simulations théoriques réalisées à 5,3 GHz (bande C), pour une polarisation HH (RADARSAT) et pour des angles d'incidence de 23° (exemple mode S1) et de 43° (exemple mode F3) C-HH (RADARSAT) et C-VV. Alors qu'en début de cycle la rétrodiffusion est la même pour les deux incidences, vers 50 jours le signal à 43° sature (-10 dB) alors qu'il continue de croître pour un angle d'incidence de 23° (jusqu'à -6 dB). On retrouve les résultats de l'analyse expérimentale. Ce phénomène s'explique par le fait que pour

des angles d'incidence plus importants, le trajet de l'onde dans le milieu est plus long, et donc l'atténuation par les diffuseurs de la plante (tiges, feuilles) augmente plus rapidement en fonction de la biomasse. Ainsi, en fin de cycle la différence entre les deux incidences peut atteindre 4 dB. La cartographie et l'inversion en paramètres tels que l'âge, la hauteur ou la biomasse sera donc difficile voir impossible avec de forts angles d'incidence.

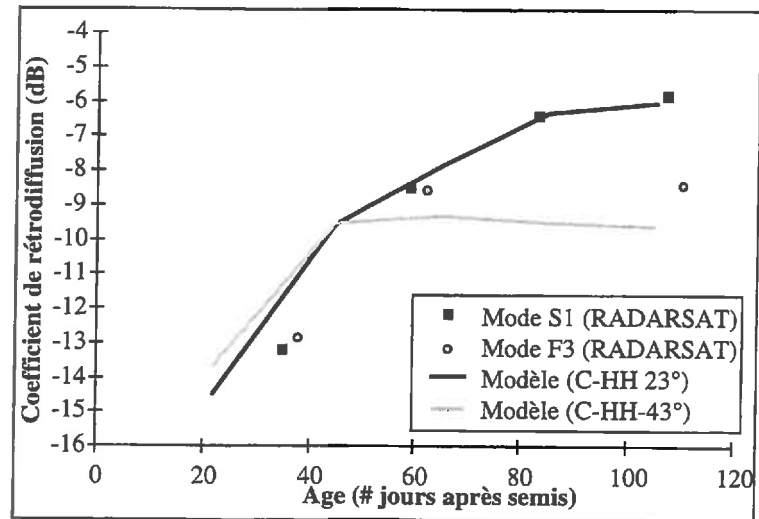


Figure 58 : Simulations théoriques de la rétrodiffusion pour la configuration C-HH et pour des incidences de 23 et 43°, et comparaison avec les mesures expérimentales.

III - CONCLUSION

L'analyse de la réponse radar des rizières en fonction des mesures de terrain a permis de mettre en évidence :

1- Une grande variabilité de la rétrodiffusion :

- Temporelle : celle-ci est due aux mécanismes d'interaction entre l'onde, la plante et la couche d'eau, qui se traduit par une croissance très rapide du coefficient de rétrodiffusion durant la phase végétative, suivie d'un niveau de saturation durant la phase reproductive.
- Spatiale : en raison de l'hétérogénéité des pratiques agricoles au sein d'une même région.

Du fait de cette forte variabilité spatiale, les méthodes traditionnelles de classification, qui, à un type d'occupation du sol donné affectent un niveau de rétrodiffusion (niveaux de gris sur l'image) ne pourront donc pas être applicables dans le cas du riz. C'est par sa variation temporelle remarquable, bien plus forte que pour tout autre type de culture que les rizières vont pouvoir être caractérisées.

2- des relations stables entre le σ^0 et les paramètres de croissance tels que la hauteur ou la biomasse qui sont particulièrement intéressants pour le suivi du cycle de la plante.

D'autre part, le modèle théorique de rétrodiffusion des rizières a permis d'interpréter et généraliser les résultats expérimentaux. Ainsi, il a pu être établi que la configuration qui optimise cette variation temporelle est celle du capteur ERS (bande C, $\theta=23^\circ$, $p=VV$). Pour des longueurs d'onde plus grandes (JERS-1) des phénomènes d'interférence limitent la détermination de relations stables entre le σ^0 et les paramètres de la plante. Pour une polarisation HH (Standard 1 de RADARSAT) la dynamique de la variation temporelle est moins grande en raison d'une rétrodiffusion plus forte en début de cycle. Enfin, pour des angles d'incidence plus forts (autres modes de RADARSAT), l'atténuation est plus importante en fin de cycle et le niveau de saturation intervient trop tôt.

Ainsi, les données ERS, et dans une moindre mesure, celles du mode Standard 1 de RADARSAT vont pouvoir être utilisées pour la cartographie et le suivi de la croissance du riz dans une optique :

- *de prévision de la production qui nécessite la connaissance des surfaces rizicoles, du nombre de récoltes par an et du rendement final,*
- *et d'estimation de l'émission de méthane, qui dépend également des surfaces rizicoles cultivées et du nombre de cultures par an mais qui est aussi fortement liée à la production de biomasse au cours du cycle de croissance de la plante.*

Enfin, le caractère polarisé de la rétrodiffusion des rizières en début de cycle est prometteur pour l'utilisation des données du futur capteur ASAR sur ENVISAT pour la cartographie et le suivi des rizières.

LES APPLICATIONS

I - ESTIMATION DES SURFACES RIZICOLES

II - SUIVI DE CROISSANCE DU RIZ

III - PREVISION DES RENDEMENTS

IV - ESTIMATION DE L'EMISSION DE METHANE

V - CONCLUSION

I - ESTIMATION DES SURFACES RIZICOLES

L'estimation de la production passe d'abord par la connaissance des surfaces rizicoles. Celle-ci doit non seulement permettre d'évaluer, pour une région, la superficie des zones cultivées en riz, mais aussi de localiser les champs afin d'en assurer le suivi. Ceci est indispensable pour déterminer, pour un champ donné, le nombre de récoltes par an, la quantité de biomasse produite ou encore de prévoir son rendement. Notre objectif premier sera donc de développer une méthode de cartographie des rizières.

I-1 Analyse du problème

En général, les projets à large échelle sont souvent confrontés à des difficultés sérieuses pour mesurer les surfaces cultivées (Malingreau, 1986a). Pour la cartographie des rizières, depuis les années 1970 plusieurs travaux ont porté sur l'évaluation des données des capteurs optiques. Des résultats très satisfaisants ont été obtenus pour des régions où tous les champs suivent le même cycle de croissance avec une seule récolte par an. Par contre, Le Toan (1977) a montré qu'en utilisant les données Landsat MSS, les méthodes supervisées paramétriques, fondées sur l'hypothèse gaussienne des réponses des classes, telles que la méthode du maximum de vraisemblance, ne peuvent pas s'appliquer avec efficacité. En effet, en raison de la diversité des stades de croissance dans les différentes parcelles avant le stade de recouvrement maximum, les réponses Landsat des rizières présentent une dispersion plus grande que celles des autres types de cultures ainsi qu'un caractère non unimodal. D'autres méthodes consistent à discriminer les cultures de riz lorsqu'elles se trouvent à un stade de croissance pour lequel les rizières se distinguent des autres cultures. Ces méthodes dépendent de la région considérée et ne sont pas forcément applicables à tous les sites de production de riz. Ainsi, Malingreau (1986a) considère, sur un site en Indonésie (île de Java) que les périodes adaptées à la discrimination des rizières sont soit celle de l'inter-culture ou d'après récolte (lorsque seules les pailles restent sur le champ) soit celle de la mise en eau des champs. Au contraire, en Afrique, Turner et Congalton (1998) ont trouvé que la période la plus adaptée était celle du labour, juste avant la mise en eau, car durant la période d'inondation il est très difficile de distinguer les rizières de la végétation alentour. D'autres méthodes utilisent les indices de végétation. Mais dans ce cas, les rizières ne peuvent être détectées qu'environ 49 jours après semis, ce qui, si l'on considère la répétitivité temporelle des satellites, limite fortement la période durant laquelle les images peuvent être acquises (Malingreau, 1986a). Okamoto et Fukhura (1996) ont obtenu, par la méthode de l'analyse des pixels mixtes de Landsat TM, des

résultats de classification riz/non de plus de 95%.Cependant, cette méthodologie ne s'applique qu'aux régions où tous les champs de riz sont plantés en même temps, ce qui n'est pas le cas en milieu tropical. L'inventaire des rizières nécessite donc l'acquisition de plusieurs dates ainsi qu'un découpage de la zone étudiée en sous-zones de même paysage. De la même façon, Malingreau (1986a) a soulevé le problème de l'hétérogénéité des scènes contenant des champs de riz. Celle-ci est encore plus importante dans les régions où la disponibilité en eau est permanente tout au long de l'année et où des variétés non périodiques peuvent donc être plantées à tout moment. Ainsi, il considère également qu'il est nécessaire d'étudier les rizières à l'échelle des Golongans (groupes de champs suivant le même cycle de croissance). C'est pourquoi il propose une méthode de stratification des zones de croissance du riz par une procédure multi-étapes basée sur les photos aériennes et Landsat. Ainsi, ces méthodes sont relativement lourdes car elle nécessitent de séparer préalablement les champs de riz en zones homogènes.

Il résulte des travaux précédents, que la cartographie des rizières nécessite l'acquisition d'images à des périodes précises ou de plusieurs images durant le cycle de croissance de la plante. Ces contraintes sont particulièrement fortes en milieu tropical car la couverture nuageuse y est quasi-permanente. Dans le contexte de cartographie du riz, principalement produit en milieu tropical, l'utilisation des données satellites radar s'avère donc particulièrement appropriée.

Cependant, la méthode de cartographie des rizières reste à développer. En effet, étant donné la grande variabilité spatiale des réponses radar des rizières sur une même image, les méthodes standards de classification, basées sur une similitude des valeurs d'intensité des pixels d'une même classe, ne s'appliquent donc pas au contexte de la cartographie du riz.

En 1989, une méthode de cartographie des rizières à l'aide des données du capteur radar aéroporté VARAN-S a été développée par Le Toan et al. (1989). Ce capteur permettait l'acquisition de données en bande X avec une double polarisation : HH et VV. La méthode consistait à utiliser la différence de rétrodiffusion entre les deux polarisations pour localiser les rizières. Les capteurs actuels tels que ERS ou RADARSAT, ne présentent pas cette double information de polarisation. Cependant, ils présentent une répétitivité temporelle suffisante pour permettre plusieurs acquisitions durant un même cycle de croissance.

C'est cette information multitemporelle qui va être utilisée pour développer la méthode de cartographie des rizières, à l'aide des données des satellites radar, présentée dans ces travaux.

I-2 Méthodologie

Un algorithme de cartographie des rizières basé sur la quantification du changement temporel du signal radar a été développé.

I-2-1 Mesure du changement temporel

La variation temporelle du signal radar entre deux acquisitions peut être estimée soit par la différence, soit par le rapport des intensités aux deux dates. Ces méthodes nécessitent un étalonnage et un recalage spatial précis des données multitudes. Ces deux conditions sont facilement remplies avec les données ERS et RADARSAT (mode Standard), dans la mesure où des images de même orbite (ascendante ou descendante) sont utilisées. Ainsi, il est possible de développer des applications basées sur le changement temporel de la rétrodiffusion radar.

La technique du rapport des intensités est cependant mieux adaptée aux caractéristiques des données radar. En effet, dans le cas de la différence des intensités, l'erreur commise dans l'estimation des changements n'est pas constante et dépend de la valeur moyenne des intensités locales. Au contraire, dans le cas du rapport, l'erreur commise ne dépend pas de la radiométrie respective des deux canaux mais uniquement de leur rapport (Touzi, 1988). Cette erreur, et donc la précision de l'estimation du changement temporel, est fonction du nombre d'échantillons, de la corrélation entre les canaux, mais surtout d'un paramètre appelé « Nombre Equivalent de Vues », noté L (Rignot et Van Zyl, 1993 ; Bruniquel, 1996). Ce paramètre est inversement proportionnel à la variance du speckle dans l'image.

Le Speckle est un phénomène caractéristique des images radar qui résulte de la cohérence de l'onde radar. En effet, les cellules de résolution, qui correspondent à une cible étendue, contiennent chacune plusieurs éléments diffuseurs (feuilles, tiges) dont les réponses élémentaires s'ajoutent de manière cohérente en amplitude et en phase. Le champ électrique total est alors la somme vectorielle de tous les champs rétrodiffusés par les diffuseurs. La position des diffuseurs étant aléatoire à l'intérieur d'une cellule de résolution, le champ électrique total, pour chacune des directions de polarisation, reçu par l'antenne est également une variable aléatoire. Ces interférences pouvant être constructives ou destructives, la somme vectorielle donnera un champ électrique très faible ou au contraire très grand. Le caractère aléatoire de ce phénomène introduit pour chaque pixel une

amplitude différente donc un niveau de gris différent, ce qui se traduit par une granularité de l'image (une zone homogène sera constituée de pixels avec des tons de gris très variés), appelée « speckle ».

Entre deux acquisitions ERS (35 jours) ou RADARSAT (24 jours), il est reconnu que, pour des surfaces de type agricole, les pixels entre images sont décorrélés (Oliver et Quegan, 1998). Ceci est particulièrement justifié en milieu tropical où la croissance de la végétation est rapide.

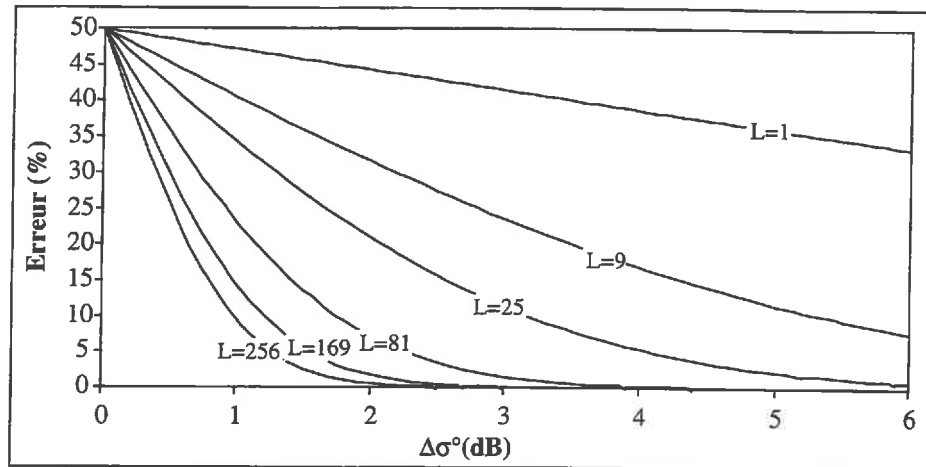


Figure 59 : Nombre de vues (L) nécessaire pour détecter un certain niveau de $\Delta\sigma^\circ$ pour une erreur donnée (%), sous hypothèse de non corrélation des pixels (source : Bruniquel, 1996).

La Figure 59 montre, pour une corrélation nulle entre deux images, et dans l'hypothèse du speckle pleinement développée (grand nombre de diffuseurs aléatoirement disposés par cellule de résolution), la probabilité d'erreur commise sur le rapport des intensités ou des coefficients de rétrodiffusion (ou différence en dB) pour différentes valeurs de L. On voit que moins le nombre de vues est important, plus l'erreur commise sur l'estimation de $\Delta\sigma^\circ$ sera forte. Ainsi, pour détecter un changement de l'intensité radar de moins de 1 dB avec un intervalle de confiance de plus de 90%, le nombre effectif de vues (L) doit dépasser 256. Dans le cas des champs de riz, lorsque le changement est de l'ordre de 3 dB ou plus, la réduction du speckle n'a pas besoin d'être aussi importante et un nombre de vues de 64 est suffisant pour un intervalle de confiance de 90%. Pour pouvoir estimer de manière précise le changement temporel entre plusieurs acquisitions, l'effet du speckle devra donc être réduit par l'intermédiaire de filtres adaptés aux caractéristiques des images radar.

D'autre part, la méthode des rapports d'intensité est très robuste aux erreurs radiométriques qui sont reproduites exactement lors de deux passages du satellite. Ces erreurs comprennent les erreurs de correction du diagramme d'antenne et, plus important, les erreurs de calcul des surfaces diffusantes, par exemple dans les zones de relief (Van Zyl et al., 1993).

En effet, en terrain accidenté, si les variations de l'incidence locale ne sont pas corrigées, des erreurs importantes peuvent être commises dans l'estimation de la section efficace de diffusion radar, et donc dans celle du coefficient de rétrodiffusion. Ces erreurs sont d'autant plus importantes que l'angle d'incidence du capteur est faible.

Le coefficient de rétrodiffusion radar $\sigma^o(\theta_i)$ d'une cible présentant un angle d'incidence local θ_i , peut être exprimé de la façon suivante (Shi et al., 1994) (16) :

$$\sigma^o(\theta_i) = \sigma_n^o f(\theta_i) \quad (16)$$

avec σ_n^o = coefficient de rétrodiffusion normalisé de l'effet de l'incidence locale
 $f(\theta_i)$ = variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion d'une cible
 donnée

Le facteur multiplicatif $f(\theta_i)$ s'applique de la même façon pour des passages successifs d'un même satellite (même longueur d'onde, même polarisation, même angle d'incidence). Donc, si l'on considère deux images d'un même capteur, notées 1 et 2, acquises à deux dates différentes, le rapport entre ces images peut s'écrire (17) :

$$\frac{\sigma_1^o(\theta_i)}{\sigma_2^o(\theta_i)} = \frac{\sigma_{n1}^o f(\theta_i)}{\sigma_{n2}^o f(\theta_i)} = \frac{\sigma_{n1}^o}{\sigma_{n2}^o} \quad (17)$$

Ainsi, le rapport des coefficients de rétrodiffusion est indépendant de l'effet de l'incidence locale, ce qui permet de supprimer l'effet du relief. Pour les rizières en terrasses dans les zones montagneuses, la diminution de l'effet de topographie est importante, de façon à ne détecter que les changements temporels des champs de riz.

Enfin, les erreurs de correction du diagramme d'antenne sont des facteurs multiplicatifs, constants dans le temps, et seront donc également éliminés dans l'image des rapports (Weydahl, 1992 ; Rignot et Van Zyl, 1993).

I-2-2 Algorithme de cartographie des rizières

L'algorithme de cartographie du riz suit les étapes suivantes : filtrage des images, rapport des intensités des images multidates, segmentation riz/non riz, production de la carte des rizières. L'illustration de la méthode et les résultats seront réalisés sur le site de Semarang pour les données ERS et le site de JATISARI pour les données RADARSAT.

I-2-2-1 Filtrage

Différentes techniques peuvent être utilisées pour réduire l'effet du speckle. Généralement le choix des filtres résulte du compromis entre l'augmentation de la résolution radiométrique (diminution du speckle) et la diminution de la résolution spatiale.

La technique du traitement multivues (L vues), effectuée pendant le traitement de l'image RSO, est la première méthode utilisée pour réduire le speckle. Ce procédé diminue la variance du signal par un facteur L mais dégrade la résolution azimuthale du même facteur. Comme les données ERS ou RADARSAT (mode Standard) ont un nombre de vues égal à 3, la réduction résultante du speckle est insuffisante pour donner une image des rapports avec une précision suffisante (Figure 60a et b). Un filtrage supplémentaire doit être effectué. Les filtres qui seront choisis devront réduire l'effet du speckle significativement, sans trop affecter la résolution spatiale, et donc préserver les structures fines.

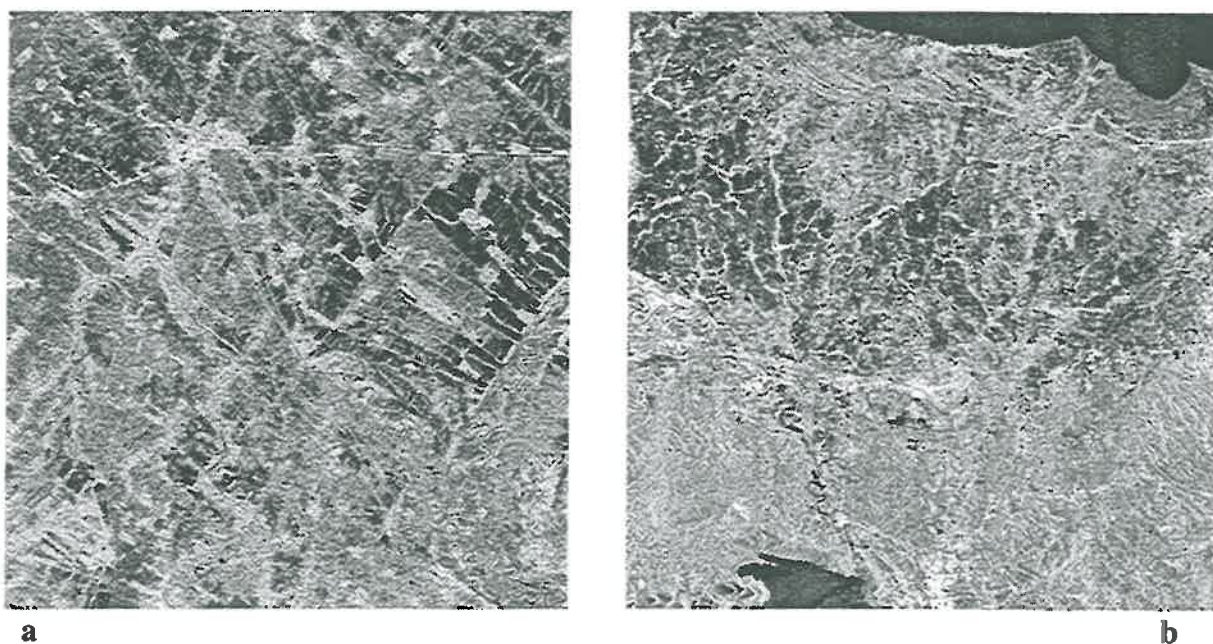


Figure 60 : Images 3 vues (a) du site (23 x 25 km) de Semarang (ERS) au 06/03/94, (b) du site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT) au 18/11/96

Les filtres développés pour les images optiques ne sont généralement pas adaptés aux caractéristiques du speckle. Certains filtres, simples et d'utilisation facile ont cependant été appliqués au filtrage des images radar :

- le filtre moyenne qui est efficace sur les zones homogènes mais dégrade fortement la résolution spatiale,
- le filtre médian qui, s'il est bien adapté au lissage des points isolés, est peu efficace pour diminuer le speckle.
- Les filtres géométriques (Crimmins, 1985) ainsi que les filtres basés sur la morphologie mathématique (Safa et Flouzat, 1989) qui permettent de préserver les grandes structures suffisamment contrastées tout en filtrant énergiquement le speckle mais détruisent l'information texturale et lissent les cibles ponctuelles.

Des filtres spécifiques aux caractéristiques des images radar doivent donc être utilisés (Bruniquel, 1996) :

- le filtre de Kuan (Kuan et al., 1987) donne de très bons résultats pour une image ayant un nombre équivalent de vues dépassant la dizaine. Par contre, il lisse les contours et les lignes sur une image 3-vues.
- le filtre de Lee (Lee, 1983) est quasiment équivalent au filtre de Kuan pour des images de plus de 3 vues. Par contre, pour des images 1-vue, la qualité du filtrage est moins bonne qu'avec le filtre de Kuan.
- Le filtre de Frost (Frost et al., 1982) prend en compte la corrélation spatiale des pixels. A partir de ce filtre, Lopes et Séry (1997) ont développé le filtre MMSE (Minimum Mean Square Error) spatial, qui tient également compte de la corrélation du speckle.
- Le filtre Gamma-Gamma MAP (Maximum A Posteriori) est basé sur la théorie bayésienne (Lopes et al., 1993) et utilise la loi gamma qui s'applique bien à la texture des scènes naturelles pour des images multivues (Bruniquel, 1996). Il permet une meilleure conservation des cibles brillantes que le filtre MMSE (Oliver et Quegan, 1998). Cependant, il présente des artefacts autour des fines structures, qui peuvent être diminués en utilisant une taille de fenêtre réduite, ne devant cependant pas descendre au-dessous de 3 pixels de côté sous peine de moyenniser les structures (Oliver et Quegan, 1998).

Plus la taille de la fenêtre de traitement utilisée pour ces filtres est grande, plus le filtrage est important. Pour passer d'une image 3 vues à plus de 60 vues, un filtrage spatial seul, même adapté aux images radar, serait trop violent pour la préservation de la résolution géométrique. Ainsi, en 1994, Bruniquel et Lopes ont présenté un filtre multitemporel permettant d'obtenir à partir de N images multitemporelles, N images filtrées avec une meilleure résolution radiométrique (niveau de speckle réduit d'un facteur N), et une résolution spatiale conservée. En effet, dans la mesure où tous les paramètres statistiques sont bien estimés et les images parfaitement recalées, et comme l'opération consiste en une sommation pixel-à-pixel, on peut admettre que la résolution spatiale reste la même.

Ainsi, plus le nombre d'images disponible sera élevé, moins le filtrage spatial devra être fort (taille de la fenêtre moins importante).

Nous avons donc choisi d'utiliser deux filtres dans l'ordre suivant :

- 1- Le filtre multitemporel (18) développé par Bruniquel et Lopes (1994) est utilisé dans un premier temps.

$$\hat{x}_i = \sum_{j=1}^N \alpha_j DN_j \frac{\langle I_i \rangle}{\langle I_j \rangle} \quad \text{avec } i = 1, \dots, N \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^N \alpha_j = 1 \quad (18)$$

avec \hat{x}_i = Réflectivité radar filtrée (non biaisée)

DN_i = Valeur du pixel i sur l'image radar

$\langle I_i \rangle$ = Mesure des intensités moyennes du pixel

N = Nombre d'images temporelles

α_j = Coefficient pondérateur attribué au canal j. Différentes méthodes permettent de les calculer. Nous avons utilisé la méthode de la « minimisation de la variance » (Bruniquel et Lopes, 1997).

Si l'on considère que les données ERS et RADARSAT des surfaces rizicoles, sont décorréliées après 35 jours et 24 jours respectivement (Oliver et Quegan, 1998), le nombre de vues après le filtrage, en utilisant N images multitemporelles de 3 vues, peut être estimé à 3xN vues. Ainsi, sur le site de Semarang, où 4 images ERS sont disponibles, le nombre de vues des images filtrées sera égal à L=12 (Figure 61a). Pour le site de Jatisari, pour lequel 6 images ont été acquises, le nombre de vues résultant est de L=18 (Figure 61b).

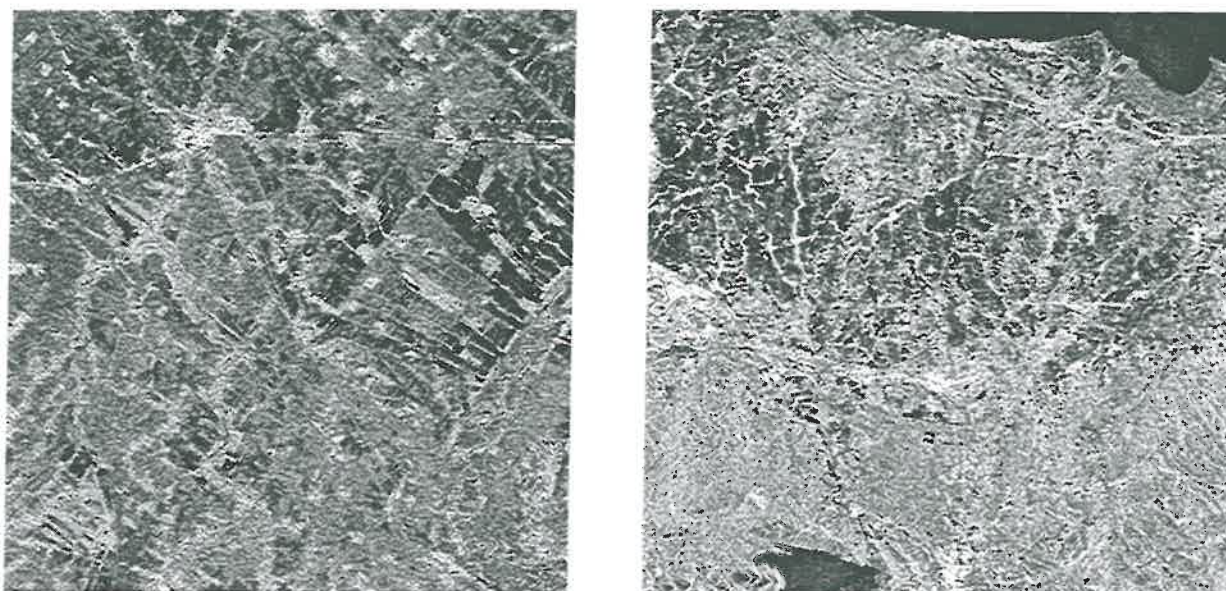


Figure 61 : Images après application du filtre multitemporel
(a) du site (23x25 km) de Semarang (ERS) au 06/03/94,
(b) du site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT) au 18/11/96.



Figure 62 : Images après application du filtre multitemporel suivi du filtre spatial
(a) du site (23x25 km) de Semarang (ERS) au 06/03/94,
(b) du site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT) au 18/11/96.

- 2- Une fois cette opération réalisée, il est possible d'utiliser un filtre spatial avec moins de force. Nous avons choisi le filtre spatial Gamma-Gamma MAP ("Maximum A Posteriori") (19) développé par Lopes et al. (1993) sur une fenêtre 7x7 (Oliver et Quegan, 1998).

$$\hat{R}_{MAP} = \frac{(\alpha - L - 1) \langle R \rangle + \sqrt{\langle R \rangle^2 (\alpha - L - 1)^2 + 4\alpha L \langle R \rangle}}{2\alpha} \quad (19)$$

avec \hat{R}_{MAP} = Intensité radar estimée, L = Nombre de vues,

$$\alpha = \frac{1}{\langle C_R \rangle^2} \quad \text{avec } C_R = \text{Coefficient de variation local}$$

Si l'on tient compte de la corrélation spatiale entre les pixels, le nombre de vues résultant après l'application des deux filtres est d'environ $L = 3N \times (7 \times 7 / 3) = 49 N$ vues. Si seulement 2 images multirates sont disponibles ($L = 100$ vues), il est possible de détecter des changements dans l'intensité radar inférieurs à 1 dB avec un intervalle de confiance d'environ 80%. Si on utilise les 4 images temporelles ERS ($L=200$ vues), l'erreur de probabilité passe de 20 à 15% (Figure 62a). Pour le site de Jatisari ($L=300$ vues), elle est inférieure à 10% (Figure 62b). Cette considération est importante pour l'application des méthodes sur les champs de riz de faible dimension. A titre d'exemple, lorsqu'un seuil de 3 dB est utilisé pour détecter les rizières avec $N=4$ dates de ERS, un nombre de Looks $L=64$ est nécessaire (Figure 59). Ceci correspond à un nombre de pixels $=L/N = 16$ soit une fenêtre de 4 x 4 pixels, c'est à dire une surface de 50 x 50 m (1/4 d'hectare).

I-2-2-2 Rapport des Intensités des images

Le rapport est effectué sur les images filtrées. On peut obtenir :

- L'image des changements temporels entre deux dates ($I1 / I2$) dans le cas où seul le rapport d'intensité entre deux dates est effectué. Le changement peut être négatif ($I2 > I1$) dans le cas où la rétrodiffusion augmente entre les deux dates, ou positif ($I2 < I1$) dans le cas où elle diminue. Sur l'image résultat, les zones grises, correspondent à une rétrodiffusion stable, alors que les zones claires ou sombres correspondent à des rétrodiffusions qui changent de façon importante, dans le sens positif ou négatif.

La Figure 63 compare l'image des changements entre deux dates, obtenue sur le site de Semarang, avec la simulation de la succession des cultures. Ainsi, on s'aperçoit que les zones claires correspondent aux rizières précoces qui finissent un cycle à la première date et débute un nouveau cycle à la seconde, et les zones sombres, correspondent aux rizières tardives qui passent du stade semis au stade maturité entre les deux dates.

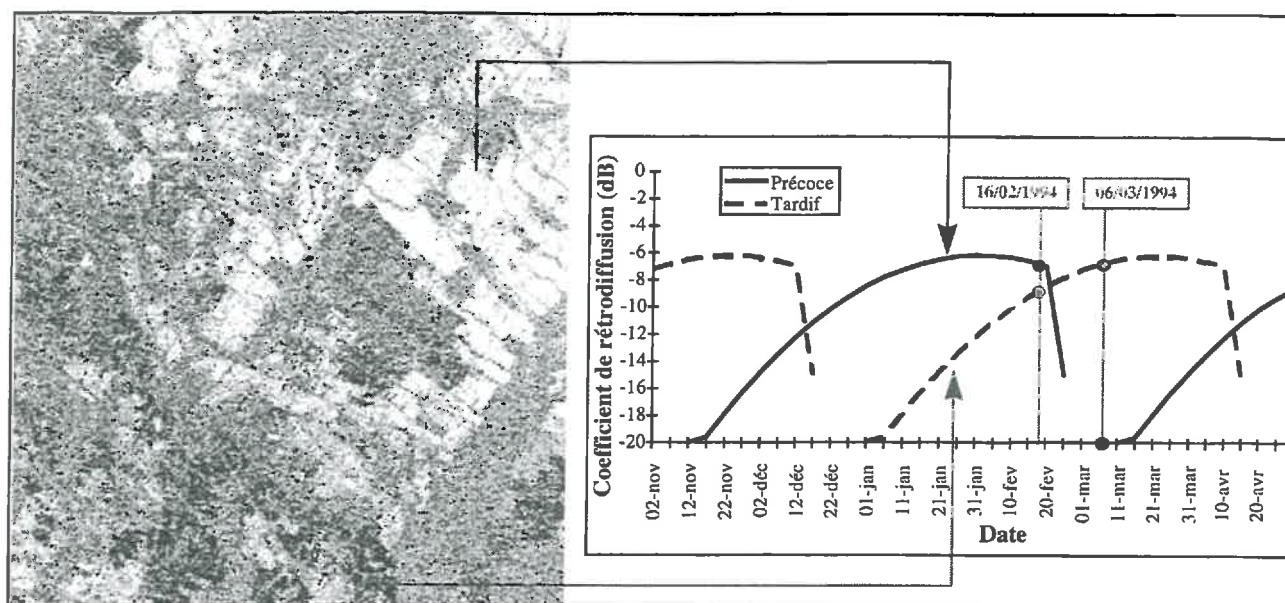


Figure 63 : Comparaison entre le résultat du rapport des images (16/02/94) / (06/03/94) et la simulation de la succession des cultures (site de Semarang)

- L'image du changement temporel maximal : dans le cas où le changement temporel est calculé sur plus de deux images. Cette image correspond à la maximisation du rapport des intensités (20) :

$$\text{Changement temporel maximum} = \left| \text{Max}_{i,j} \left(\frac{I_i}{I_j} \right) \right| \text{ avec } i \text{ et } j = i^{\text{ème}} \text{ et } j^{\text{ème}} \text{ images} \quad (20)$$

Dans ce cas, le changement temporel n'est pas signé. Les zones sombres correspondent aux zones pour lesquelles la rétrodiffusion est stable, et les zones claires, aux zones pour lesquelles la rétrodiffusion change beaucoup dans le temps.

Un exemple de l'image des changements temporels entre deux dates et de la classification qui en résulte est présenté par Le Toan et al. (1997). Cependant, dans la mesure où plusieurs dates sont disponibles, c'est l'image du changement temporel maximal qui nous intéresse, car elle utilise l'information présente dans chacune des images. En effet, par exemple pour le site de Semarang (ERS), dans le cas où seules les dates du 16/02/94 et du 06/03/94 sont acquises, les rizières tardives seront relativement mal discriminées car la croissance de la plante est peu importante entre ces deux dates. Par contre, les rizières précoces pourront être très bien discriminées car le changement de la rétrodiffusion est très fort entre la fin d'un cycle et le départ d'un nouveau cycle (Figure 63).

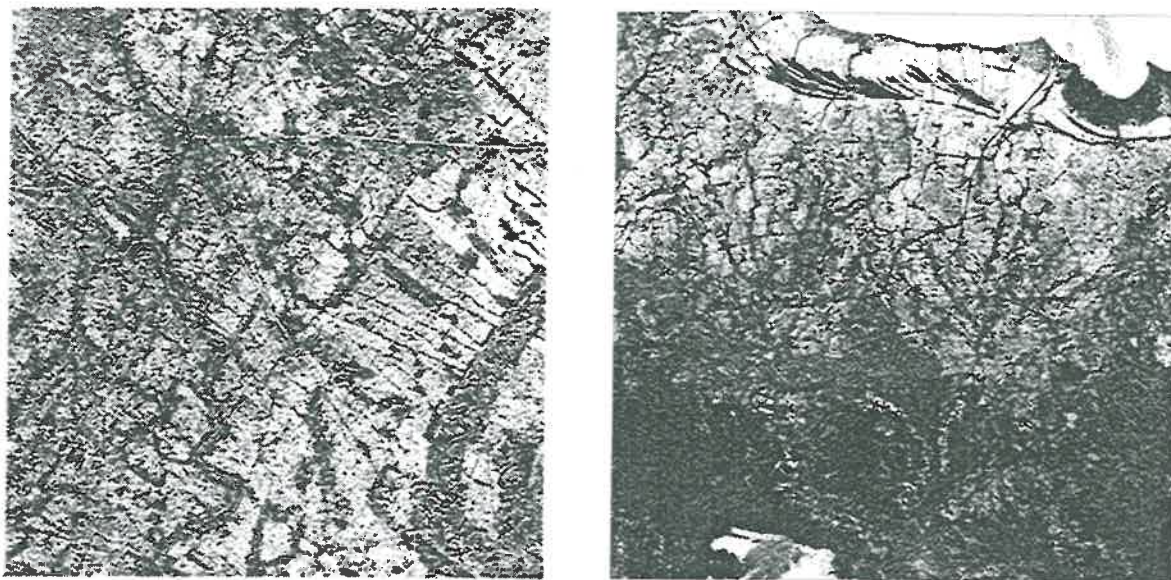


Figure 64 : Image du changement temporel maximal pour (a) le site (23x25 km) de Semarang (ERS) et (b) le site (50x50 km) de Jatisari (RADARSAT)

La Figure 64 montre les images du changement temporel maximal obtenues pour, (a) les données ERS (site de Semarang), et (b) les données RADARSAT (site de Jatisari).

1-2-2-3 Segmentation Riz-Non Riz

Le principe est de seuiller l'image des rapports pour identifier les pixels de l'image dont la rétrodiffusion présente une variation temporelle supérieure à un certain seuil. Dans le cas où l'acquisition des données radar est optimale, le niveau du seuil pour la cartographie des rizières peut être fixé. Cependant, si le plan d'acquisition des données n'est pas optimal, ce seuil peut être modifié en considérant le calendrier culturel local et la nature des autres types d'occupation du sol de la région étudiée. Sur l'ensemble de nos données (Semarang, Akita, Jatisari) un seuil de 3 dB a été utilisé avec succès. Ce seuil a été d'autre part validé par Liew et al. (1997a et b) pour la cartographie des rizières dans le Delta du Mekong au Viêt-nam.

Selon la région étudiée, il peut être nécessaire d'utiliser des masques pour les zones telles que la mer ou les lacs. En effet, si à une date d'acquisition, il y a du vent, la rétrodiffusion de ces zones d'eau va varier de façon très importante et ces zones seront donc confondues avec le riz. Il est facile, à partir de cartes topographiques, même très anciennes, de réaliser des masques pour la mer ou les lacs. Nous avons utilisé un masque pour le barrage de Jatiluhur et la mer de Java pour le site de Jatisari. Ce masque peut être directement extrait de cartes de la région ou digitalisé manuellement à partir de l'image radar, ou encore peut être extrait automatiquement d'images radar pour lesquelles les zones d'eau présentent une rétrodiffusion très basse et très homogène.

Une fois, la segmentation effectuée, une image binaire riz/non riz est obtenue. L'étape finale consiste à éliminer les pixels résiduels isolés. Une méthode itérative simple est utilisée, qui consiste à éliminer tout pixel de riz à l'intérieur d'une fenêtre si aucun autre pixel de la fenêtre n'est classé en riz. La Figure 65a et la Figure 65b montrent les résultats de la segmentation obtenus pour, respectivement, les données ERS (site de Semarang) et les données RADARSAT (site de Jatisari).

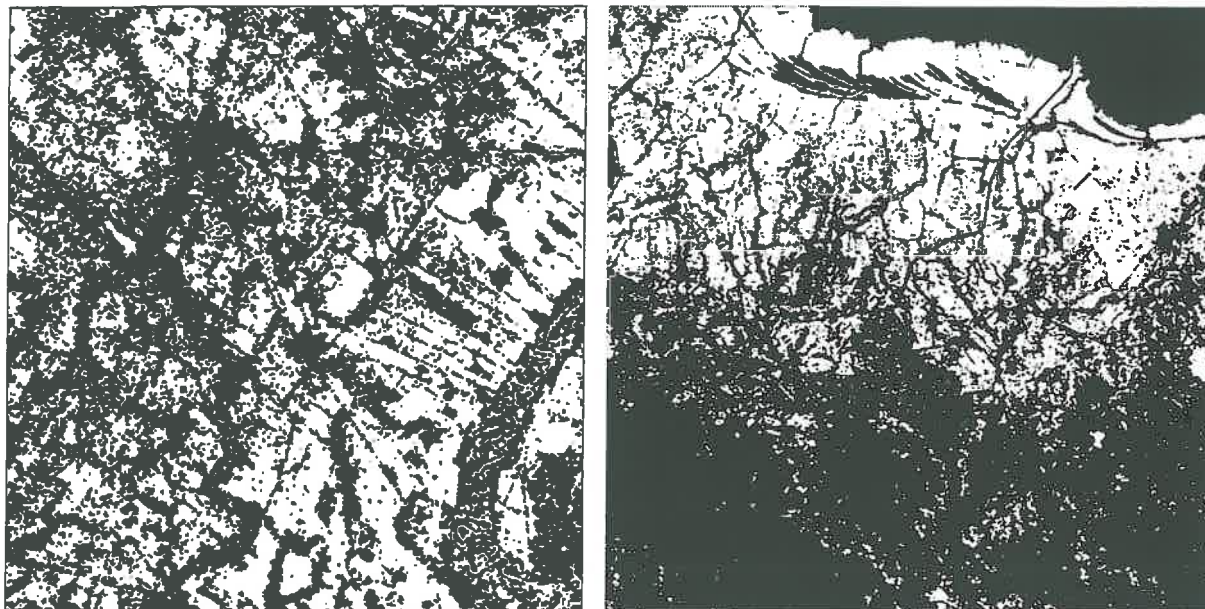


Figure 65 : Résultat de la segmentation riz/non riz pour (a) le site (23 x 25 km) de Semarang (ERS), (b) le site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT)

I-3 Résultats et Validation

I-3-1 Site de Semarang (ERS)

La Figure 66 présente le résultat de la segmentation sur fond d'image radar pour le site de Jatisari. Les zones de riz sont présentées en vert et les zones de non riz apparaissent en niveaux de gris.

Les classes de « non riz » regroupent les zones urbaines, les zones de fort relief non appropriées aux cultures, les zones boisées, et les autres cultures telles que les plantations de canne à sucre. Les zones de « riz » regroupent à la fois les rizières précoces et les rizières tardives.

En suivant la succession des cultures (Figure 40) on peut voir que les rizières précoces sont bien détectées par le changement qui intervient entre les 16/02/94 et le 06/03/94 alors que les rizières tardives sont discriminées par le changement qui intervient entre le 23/01/94 et le 06/03/94. Ainsi, l'utilisation de 3 dates (23/01/93, 16/02/94 et 06/03/94) est nécessaire pour une bonne classification des rizières.

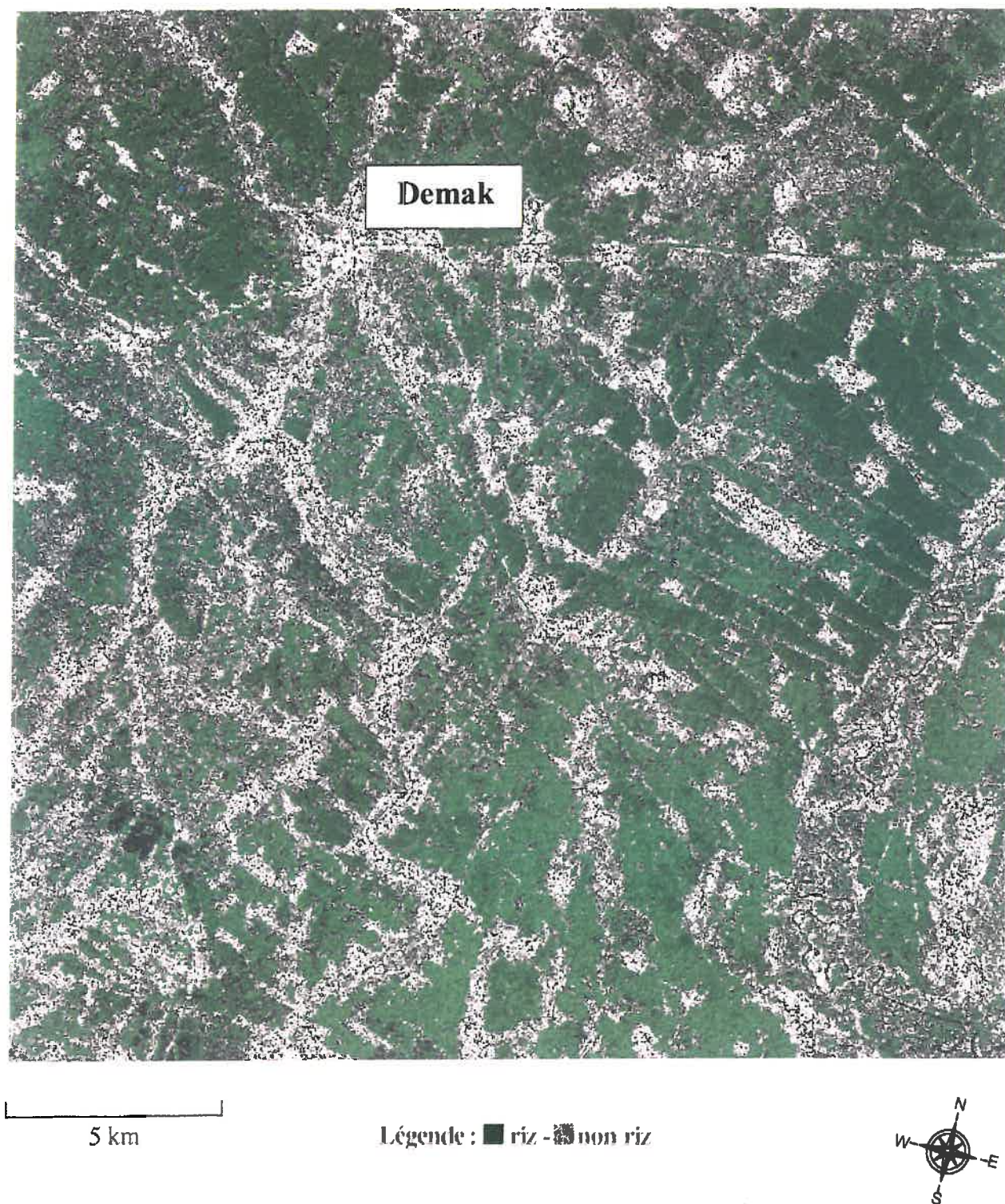


Figure 66 : Carte des rizières de Semarang (ERS)
23 x 25 km - 06/03/94

Aucune carte d'occupation des sols n'étant disponible pour le site de Semarang, il n'a pas été possible d'évaluer la précision du résultat de la cartographie. Cependant, le résultat correspond bien aux informations mesurées sur le terrain et les fins détails tels que le parcellaire sont assez bien respectés. Tous les champs sur lesquels des mesures ont été réalisées ont bien été classés en riz. Les zones repérées comme villages, route, rivières, forêt ou canne à sucre ont été classées en « non riz ».

A titre de comparaison, une image SPOT HRV (Figure 67) a été acquise en Mai 1994, la seule sans couverture nuageuse sur la zone, dans le cadre de l'étude. Sur cette image, les zones de riz et de non riz correspondent, dans l'ensemble, avec le résultat de la classification radar (Figure 66). Cependant, avec l'image SPOT, il s'avère difficile de séparer les rizières des autres cultures, toutes les zones agricoles apparaissant en rouge (exemple, champs de canne à sucre délimités dans la zone A). De même, certaines zones de riz apparaissent comme

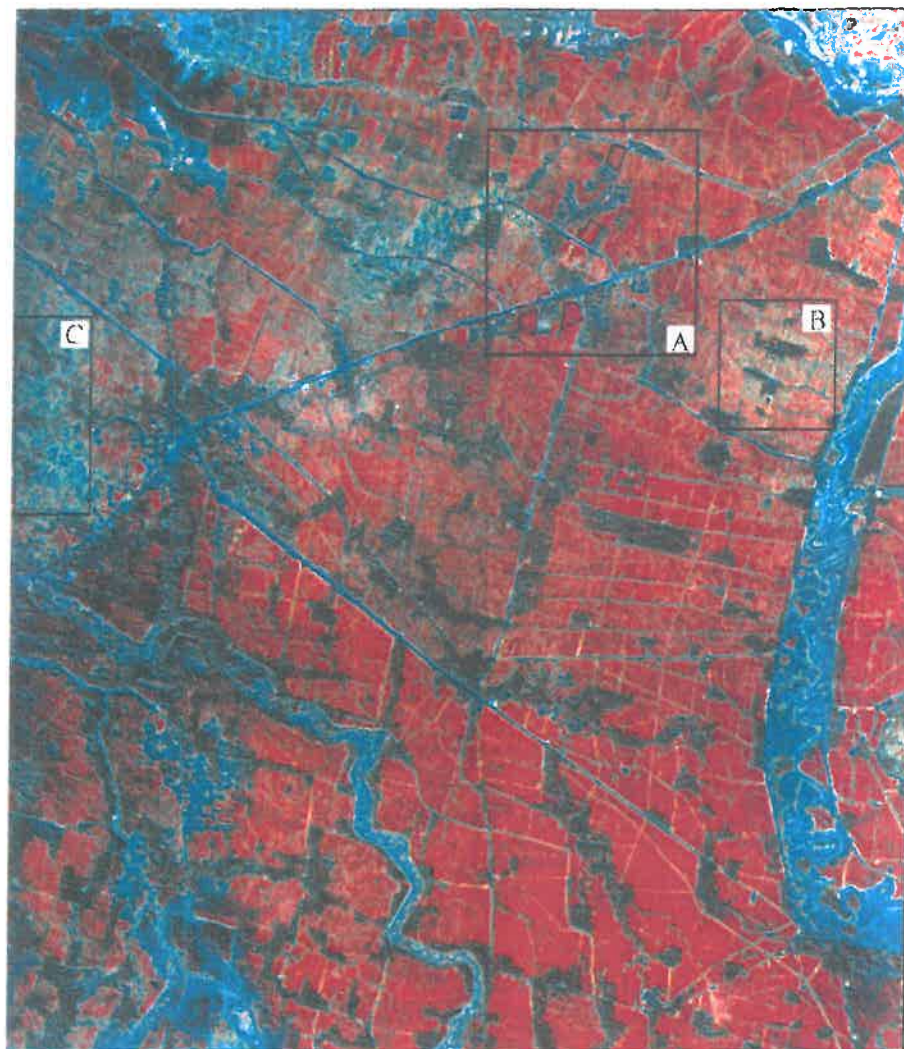


Figure 67 : Image SPOT du 26 Mai 1994

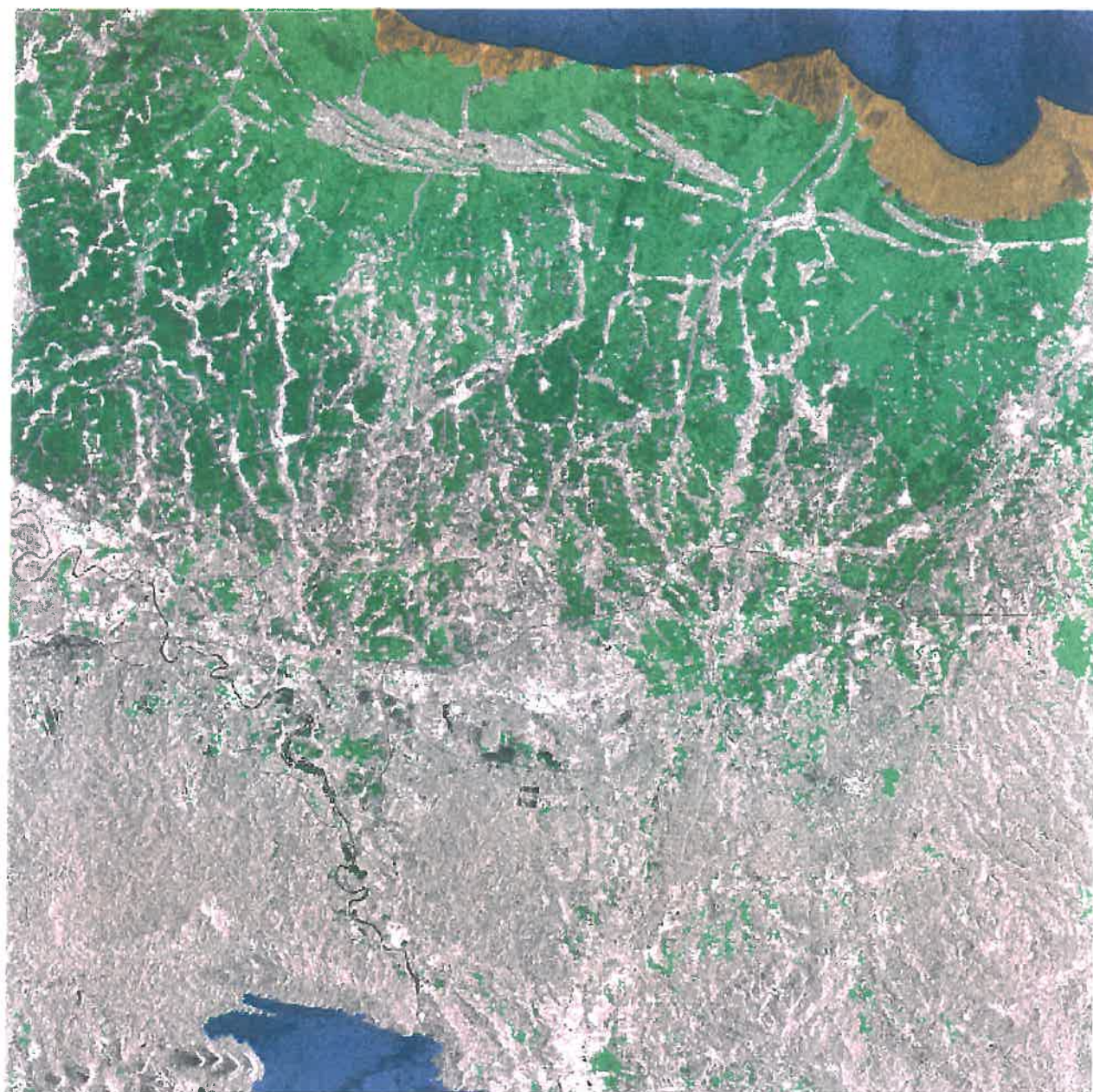
■ XS3 ■ XS2 ■ XS1

des zones à faible couverture végétale (exemples : Zone B et Zone C). Dans un cadre plus opérationnel, l'image SPOT HRV peut cependant être utilisée pour mieux affiner les structures de l'image telles que les limites des parcelles ou les routes (SCOT CONSEIL - CESBIO, 1995).

Finalement, en terme d'estimation des surfaces rizicoles, les pixels de riz représentant près de 48% de la zone étudiée, l'étendue des surfaces plantées en riz peut être évaluée à 270,5 km² sur les 563,7 km² que couvre l'image.

I-3-2 Site de Jatisari (RADARSAT)

Le résultat de la segmentation riz/non riz sur fond d'image radar est illustré Figure 68.



10 km

Légende : ■ riz - ■ non riz - ■ Eau - ■ Bassins de poisson

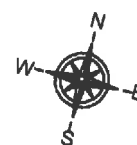
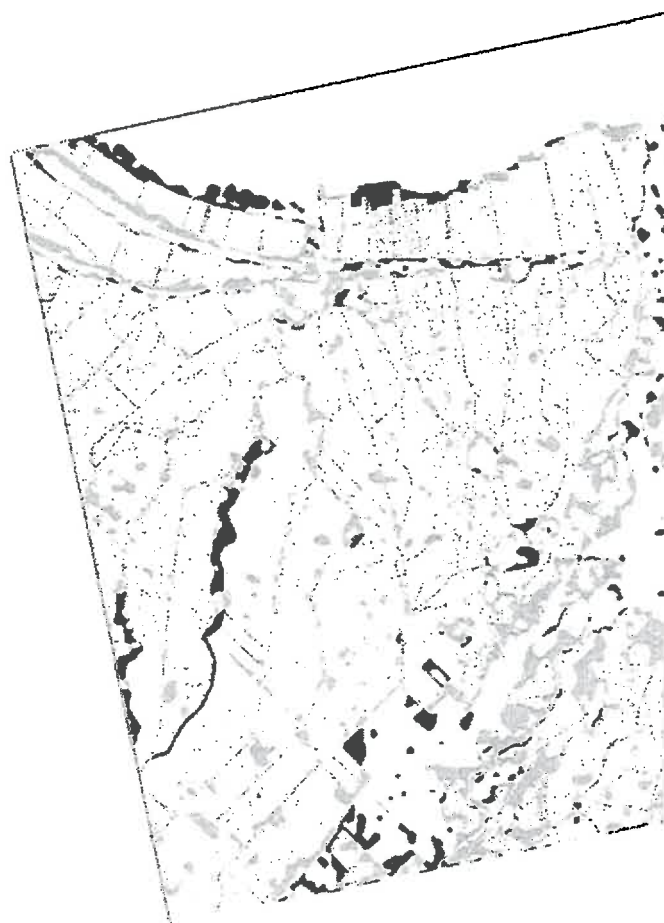


Figure 68 : Carte des rizières de Jatisari (RADARSAT)
50 x 50 km - 18 Mars 1997

Les champs de riz sont représentés en vert, les zones d'eau et d'aquaculture, dérivées du masque, sont représentées respectivement en bleu et en marron et les autres classes, en niveaux de gris.

Le site est clairement séparé en deux zones : au Nord les rizières et au Sud, les forêts ainsi que les autres classes relativement stables. Il est possible de retrouver les fins détails tels que les routes bordées par un ruban d'habitations, les voies ferroviaires, les villages et les rivières. Ceci montre que le filtre utilisé dans le processus de filtrage est un bon détecteur de contour.

Une carte d'occupation du sol de 1981 à l'échelle 1 : 250 000^{ème}, couvrant une zone de 10 x 10 km au Nord-Est de l'image radar (Figure 68), nous a permis de valider ce résultat. La carte inclue plusieurs classes telles que le riz, les villages, les rivières, les cours d'eau, l'eau (bassins d'aquaculture et mer de Java) et une classe appelée « autres classes de non riz ». Cette carte a été numérisée et recalée sur la carte riz/non riz obtenue à partir des données radar. La comparaison des deux cartes donne un bon résultat : 87,9% de pixels de riz bien classés (Tableau 10). Une bonne performance a aussi été obtenue pour les autres classes : non riz, eau, rivières, routes, et villages qui sont classées avec une précision de 80%. Seuls les petits cours d'eau sont classés en majorité en riz (Tableau 10).



Pixels bien classés : □

Pixels mal classés : ■ Pixels de riz classés en non riz

■ Pixels de non riz classés en riz

Figure 69 : Validation de la carte riz/non riz obtenue au site de Jatisari (RADARSAT) dans la géométrie de l'image radar

La Figure 69 montre (dans la géométrie de l'image radar) les pixels mal classés sur la carte dérivés des données radar comparée à celle de 1981. Deux configurations se présentent :

- 1) les pixels de riz classés en non riz (en gris)
- 2) les pixels de non riz classés en riz (noir)

La première catégorie correspond aux pixels situés principalement le long des villages. La carte de référence datant de 15 ans, on peut penser que les villages se sont en effet développés, en prenant des terres sur les rizières, parallèlement à l'augmentation de la population durant cette période. La deuxième catégorie correspond aux confusions avec les classes d'eau (rivières, cours d'eau, bassins aquacoles). Un masque plus affiné, incluant notamment les cours d'eau et les rivières aurait permis de s'affranchir d'une grande partie de ces pixels.

		Carte d'occupation du sol (1981)						
		Riz	Non Riz					
			Non Riz	Eau	Rivières	Routes	Villages	Cours d'eau
« Radar »	Riz	87,90%	26,19%	6,45%	8,00%	14,42%	7,72%	81,15%
	Non Riz	12,10%	73,81%	93,55%	92,00%	85,58%	92,28%	18,85%
TOTAL		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 10 : Détail des confusions entre les différentes classes d'occupation du sol

En terme d'estimation des surfaces, les pixels de riz représentant près de 38% de la zone étudiée, l'étendue des surfaces plantées en riz peut être évaluée à 812 km² comparée aux 2139 km² que couvre l'image.

I -4 Test de la méthode sur des rizières en terrasses

Afin de tester la méthodologie sur des zones de rizières en terrasses, nous avons sélectionné sur les images ERS de la région de Semarang, un site montagneux où les effets du relief sont particulièrement marqués, avec des zones de crêtes très brillantes, et des zones « d'ombre » très sombres. La Figure 70a présente le résultat de la composition colorée suivante : canal rouge = acquisition du 23/01/94, canal vert = acquisition du 16/02/94 et canal bleu = acquisition du 06/03/94. Sur cette image, les champs de riz apparaissent colorés, essentiellement en rouge (rizières en fin de cycle en Janvier) et en vert (rizières en fin de cycle en Février). La délimitation des rizières est, visuellement, assez difficile, avec un parcellaire très fragmenté sur l'ensemble de la zone.

La méthodologie de cartographie des rizières développée précédemment pour les images ERS et RADARSAT a été appliquée aux 4 images ERS acquises sur le site. Après avoir préalablement étalonné et recalé les images, les étapes suivantes ont donc été suivies : filtrage multitemporel, filtrage spatial, calcul de l'image des changements temporels maximum, segmentation de l'image en 2 classes :

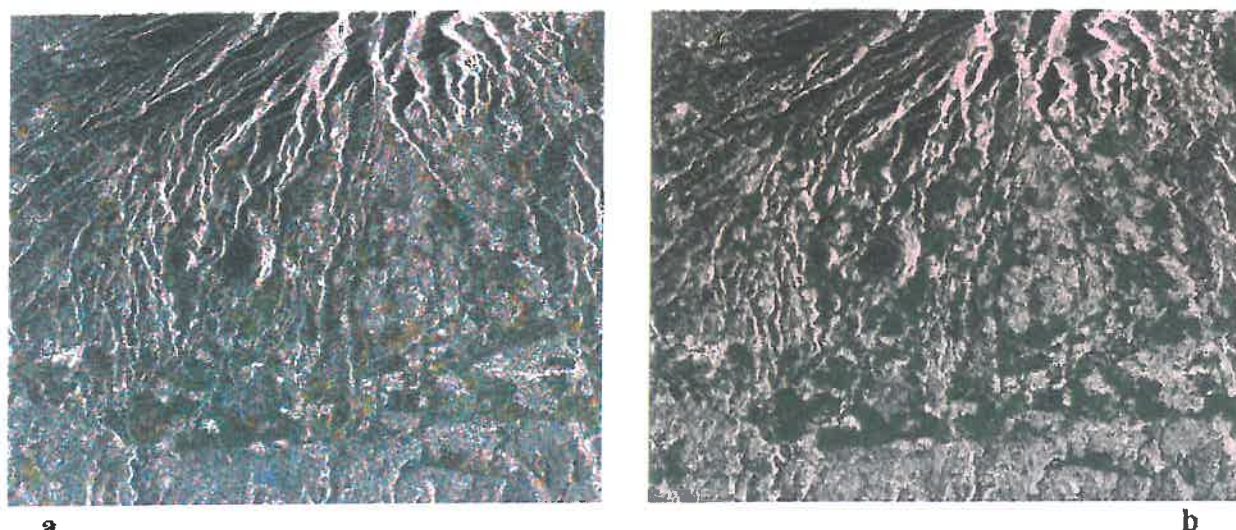


Figure 70 : Région montagneuse issue de l'image ERS de Semarang (14x11,5 km) : (a) Composition colorée : ■ 23/01/94 ■ 16/02/94 ■ 06/03/94, (b) Résultat de la cartographie ■

riz et non riz. Le résultat de la cartographie est présenté, sur fond d'image radar sur la Figure 70b. Les zones colorées dans la Figure 70a ont dans l'ensemble été bien discriminées et délimitées. Les zones de relief (crêtes ou ombres) sont toutes bien classées en non riz, ainsi que les flancs très pentus de la montagne. En effet, la technique du rapport d'intensité a permis d'éliminer l'effet de relief qui est reproduit de façon identique sur des images de même orbite, acquises à des dates différentes.

Une validation précise et quantitative n'a pu être réalisée sur cette image par manque de données terrain, mais les résultats semblent tout de même cohérents. L'utilisation de la méthodologie paraît donc également adaptée à la cartographie des rizières en terrasses.

Sur cette zone de 14 x 11,5 km, les surfaces plantées en riz sont estimées à 32,2 km² (environ 19,8% des pixels de l'image).

1-2 Discussion

L'approche proposée est basée sur l'importante variation de la rétrodiffusion radar des rizières pour identifier les zones cultivées en riz. Cette méthode nécessite l'acquisition d'au moins deux images radar (de même orbite) durant le même cycle de croissance ou durant des cycles consécutifs. Dans le premier cas, l'identification est basée sur l'augmentation de la rétrodiffusion alors que, dans le second, elle est basée sur la chute de la rétrodiffusion. L'intervalle temps entre deux acquisitions ne doit donc pas dépasser une certaine durée (80-100 jours) de façon à maximiser cette variation. La confusion entre les champs de riz et les autres types d'occupation du sol est ainsi minimisée car aucun autre type d'occupation du sol ne peut présenter un

changement temporel identique à celui des rizières. Pour les zones de croissance de riz avec des calendriers culturels non uniformes (nombre différent de cultures par an, délai dans le début du cycle de croissance dû à la disponibilité en eau, en main-d'œuvre, présence d'une culture secondaire entre deux cultures de riz), un nombre de 3 acquisitions par an est nécessaire pour une cartographie précise et robuste.

Si l'on considère un cycle, il est possible de déterminer, à partir des courbes empiriques de la variation temporelle du σ^0 , la variation de la rétrodiffusion entre 2 acquisitions radar successives (35 jours pour ERS et 24 jours pour RADARSAT). La variation du σ^0 d'un champ donné entre deux acquisitions ERS, peut varier de 7 dB en début de cycle (0 à 34 jours) à 2 dB seulement en fin de cycle (76 à 110 jours). Pour les données RADARSAT, $\Delta\sigma^0$ peut varier de 4 dB en début de cycle (0 à 24 jours) à 0 dB en fin de cycle (120 à 144 jours).

Pour RADARSAT, il est donc capital, pour la cartographie des rizières, d'acquérir des données pour lesquelles les rizières se trouvent en début de leur cycle de croissance (< 50 jours). Cette période correspondant au double de la répétitivité temporelle de RADARSAT, cela assure la disponibilité d'images pour lesquelles les rizières sont à un stade précoce de développement. Ainsi, dans le cas où plusieurs récoltes ont lieu de façon décalée, plusieurs dates seront nécessaires de façon à ce que tous les champs se trouvent un stade précoce au moment de l'acquisition des images.

La Figure 44 présente la simulation de la succession des cultures pour le site de RADARSAT. Elle permet de déterminer le nombre minimum et les intervalles d'acquisitions nécessaires pour cartographier les rizières et les Golongans, en prenant en compte la répétitivité temporelle de 24 jours des données RADARSAT. L'exercice est réalisé en se basant sur le plan d'acquisition des données RADARSAT de 1997 et peut être étendu à d'autres saisons/années culturelles. Pour la cartographie des rizières, il résulte que 3 images par cycle, acquises avec un intervalle de 48 jours, sont nécessaires et suffisantes. En effet, sur le site de Jatisari, en considérant le cycle de la saison humide, les champs du Golongan I peuvent être discriminés avec le rapport d'intensité entre les images de Novembre et de Janvier et/ou Février. Les champs du deuxième Golongan peuvent être déterminés avec le rapport entre les images de Novembre et Janvier, mais aussi de Janvier et Février car certains champs peuvent ne pas être inondés au 18/11/97. Finalement, les champs de riz du Golongan III peuvent être localisés par le rapport d'intensité entre Janvier et Février. Trois dates sont donc nécessaires pour cartographier l'ensemble des rizières, quel que soit le Golongan auxquels elles appartiennent.

De même pour ERS, l'acquisition de 3 images est nécessaire puisque les rizières tardives sont cartographiées à l'aide du rapport entre les images de Janvier et Mars et les rizières précoces à l'aide des images de Février et Mars (Figure 40).

La méthode est basée sur l'hypothèse d'une réponse faible des rizières dans la première partie du cycle de croissance. Cette hypothèse doit être évaluée en terme de limitation en raison des deux causes suivantes :

- 1) l'effet du vent qui augmente la rétrodiffusion des rizières inondées en début de cycle,
- 2) les pratiques culturales alternatives qui utilisent la méthode de semis direct sur les champs non inondés. Selon l'humidité et la rugosité des champs, la rétrodiffusion des rizières aux stades très jeunes peut alors être très variable.

La taille des champs de riz peut également être un facteur limitant. En effet, plus un champ est petit, plus le nombre de pixels utilisés pour estimer sa rétrodiffusion est réduit. Ceci augmente donc l'incertitude sur le σ^0 et donc sur les valeurs de rapport d'intensité. Dans les zones où les champs sont de très petite taille et ne peuvent pas être regroupés en zones homogènes, l'utilisation d'images d'archives peut être envisagée pour réduire l'effet du speckle lors du filtrage multitemporel. La résolution plus fine est une autre solution, à condition que l'angle d'incidence soit faible.

Enfin, des résultats prometteurs ont été obtenus en testant la méthodologie sur une zone de fort relief, où les rizières sont cultivées en terrasses. Cependant, une validation quantitative est nécessaire pour confirmer ce résultat.

Cette méthodologie n'a pas encore été testée sur les rizières pluviales. Celles-ci sont inondées seulement une partie de l'année, selon les conditions climatiques. On peut cependant penser que lors des fortes pluies, la rétrodiffusion des champs de riz changera de façon suffisante pour que la méthodologie de cartographie des rizières, développée pour les rizières irriguées, puisse être utilisée avec efficacité. Les dates d'acquisition seront cependant plus critiques. En effet, 2 acquisitions en période sèche par exemple, ne permettront pas de différencier les rizières par leur changement temporel. Il en va de même, en période humide, pour 2 acquisitions en fin de cycle de croissance. La période durant laquelle les dates devront être acquises sera donc plus courte.

II - SUIVI DE CROISSANCE DU RIZ

Une autre information nécessaire à l'estimation de la production est le nombre de cultures par an réalisées sur un champ. Une méthode de suivi des rizières est donc nécessaire de façon à déterminer combien de cycles sont réalisés successivement sur un même champ.

II -1 Analyse du problème

La tendance actuelle étant à l'augmentation des rendements, les nouvelles variétés évoluent vers un cycle de croissance plus court de façon à permettre d'enchaîner plusieurs cultures de riz sur le même champ. Ainsi, le nombre de récoltes par an, pour un champ de riz donné, peut varier de 1 dans les zones de forte latitude (Etats-Unis, Australie) à 4 dans certaines régions du Viêt-nam. Il est donc important, pour pouvoir déterminer la production annuelle totale d'une région, de connaître le nombre de cultures que supporte annuellement chaque champ. Pour cela, il faut pouvoir déceler la fin d'un cycle de croissance et le début d'un nouveau cycle. Ainsi, il est nécessaire de mettre au point une méthode de suivi de croissance des rizières.

Les résultats expérimentaux et théoriques décrits dans la Partie II ont permis de mettre en relation la variation de la rétrodiffusion des rizières et les paramètres de croissance de la plante tels que la hauteur ou la biomasse. Ainsi, il a été observé, pour les données ERS, que le seuil de saturation du signal radar correspondait au début du stade reproductif. Il va donc être possible, en inversant le coefficient de rétrodiffusion en valeur de hauteur ou de biomasse, de déterminer quand le champ est au stade végétatif et quand il est au stade reproductif, et donc de suivre la croissance de la culture.

Pour les données RADARSAT, ce seuil intervenant plus tôt, la détermination du passage du stade végétatif au stade reproductif s'avère plus délicate. Cependant, les données RADARSAT ayant une répétitivité temporelle plus importante que les données ERS (24 jours comparé à 35 jours), un nombre supplémentaire d'acquisitions par cycle est possible, ce qui devrait faciliter le suivi de la croissance de la culture.

Une méthodologie adaptée aux données ERS, et une méthodologie adaptée aux données RADARSAT, basées sur les résultats expérimentaux et théoriques, ont été développées pour suivre la croissance du riz, et donc permettre de déterminer le nombre de récoltes par an.

II -2 Méthodologie et résultats

II -2-1 Cas des données ERS : Carte des classes de hauteur

Dans la partie I, des relations entre la rétrodiffusion des rizières et les paramètres de la culture, tels que la hauteur ou la biomasse des plantes, ont été mises en évidence. Par inversion de ces relations, il est donc possible de déterminer la hauteur ou la biomasse des plantes pour chaque pixel de riz de l'image. Ainsi, le stade de développement de la culture (stade végétatif / stade reproductif) et donc, le suivi de la plante pourront être assurés.

Dans cet objectif, la hauteur des plantes nous paraît être un paramètre particulièrement adapté. En effet, la rétrodiffusion des rizières croît nettement en fonction de la hauteur de la plante jusqu'à la fin de la phase végétative. Ensuite, durant la phase reproductrice et jusqu'à la récolte, la plante ne croît quasiment plus en hauteur. Ainsi, l'inversion en paramètres de hauteur peut être réalisée avec une dispersion relativement faible (Figure 18). L'inversion en biomasse est plus délicate, plus particulièrement en fin de cycle, durant la phase reproductrice. En effet, la biomasse continue à croître durant la phase reproductrice, mais surtout peut diminuer en fin de cycle en raison d'un assèchement de la plante durant la phase de maturation (Figure 19). Ainsi, les dispersions en fin de cycle sont plus importantes qu'en début de cycle. La hauteur des plantes est donc un paramètre plus adapté pour déterminer si les rizières sont au stade végétatif ou reproductif.

La méthodologie consiste à réaliser, à partir de la classification riz/non riz et de l'inversion de la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la hauteur du riz, une cartographie des rizières à différentes classes de hauteur. Elle suit 4 étapes : la création des images des σ^0 du riz, l'inversion du σ^0 en hauteur, la création des images des hauteurs, et enfin, la création des cartes des classes de hauteur.

- 1) *Création des images des σ^0* : les zones définies comme riz par la carte riz/non riz réalisée selon la méthodologie décrite précédemment, sont transformées en σ^0 (Laur et al., 1996), pour chacune des images disponibles.
- 2) *Inversion des courbes de σ^0 vs hauteur* : afin d'associer chaque valeur de σ^0 à une valeur de hauteur, les courbes expérimentales sont inversées. La dispersion autour de la courbe est de 1,2 dB (Figure 38). Si l'on considère la partie inversible de la courbe (hauteur < 80 cm), la précision sur l'inversion de la rétrodiffusion en hauteur est de $\pm 8,2$ cm.

- 3) *Création des images des hauteurs* : les images des hauteurs sont calculées, pour chacune des dates, par la mise en relation des courbes inversées et des images de σ° .
- 4) *Réalisation de la carte des classes de hauteur* : le stade reproductif est atteint lorsque la plante mesure environ 80 cm (Figure 18). Une fois les images des hauteurs calculées pour chacune des acquisitions ERS, une segmentation est réalisée à 80 cm de hauteur, de façon à séparer à une date donnée les rizières se trouvant au stade végétatif de celles se trouvant au stade reproductif.

La Figure 71 présente le résultat des cartes des rizières au stade végétatif (vert) et au stade reproductif (jaune) aux différentes dates d'acquisition.

Ce résultat a pu être validé à l'aide des données de terrain collectées aux dates d'acquisition des images radar (Tableau 11). Il apparaît que les hauteurs sont relativement bien estimées, avec des erreurs inférieures à 10 cm. Il faut cependant tenir compte du fait que les données mesurées sur ces champs font partie du jeu de données utilisé pour établir la régression entre la rétrodiffusion des rizières et la hauteur des plantes (Figure 38). Ainsi, on retrouve pour les champs de Semarang aux jeunes stades, une sur-estimation de la hauteur des plantes. En terme de carte de classes des hauteurs, aucune erreur de classification n'est observée sur

Sites	Hauteur mesurée (cm)	σ° (dB)	Hauteur estimée (cm)	Résultat (classe de hauteur)
Dempet	88	-7,03	81,48	> 80 cm
Gajah	97,3	-6,29	97,48	> 80 cm
Demak	97,3	-6,41	92,92	> 80 cm
Andong	88,3	-6,58	88,81	> 80 cm
Karang Nakel	83,3	-6,52	90,11	> 80 cm
Karanggede A	90,6	-6,91	83,16	> 80 cm
Karanggede B	53,4	-8,77	64,65	< 80 cm
Pabelan	30,6	-12,85	41,17	< 80 cm
Ambarawa	63,3	-8,28	68,55	< 80 cm

Tableau 11 : Correspondance entre les hauteurs mesurées sur le terrain, les hauteurs estimées et le résultat de la carte des classes de hauteur au site de Semarang

l'ensemble des champ tests qui incluent des rizières tardives et des rizières précoces. Cependant, le nombre d'échantillons très faible, ne permet pas une validation exhaustive. Les résultats sont tout de même cohérents : les cycles observés lors des campagnes de terrain (Figure 40) sont bien respectés puisqu'il est possible de retrouver la récolte qui se situe fin Février. De plus entre le 10 et le 16 Février, très peu de changements sont observés ce qui nous permet de tester la cohérence du résultat.

Sur ces cartes, il est possible de suivre l'évolution des différents champs (précoces et tardifs) qui ont des cycles de croissance distincts. Les rizières tardives sont encore au stade végétatif (vert) à la première date alors que les rizières précoces sont déjà au stade reproductif (jaune). Ainsi, les rizières tardives sont au stade végétatif jusqu'en Février (en vert au 23/01/94, 10/02/94 et 16/02/94). Elles apparaissent au stade reproductif en Mars (en jaune au 06/03/94). Les rizières précoces, suivent un cycle décalé puisque leur phase végétative est achevée en Février (en vert au 23/01/94 et en jaune au 10/02/94 et au 16/02/94). Ces rizières sont récoltées entre le mois de Février et le mois de Mars, alors que les rizières tardives se trouvent encore entre la fin de leur phase végétative et le début de leur phase reproductrice. La carte des classes de hauteur du mois de Mars montre que les rizières précoces sont à nouveau classées en phase végétative (en vert au 06/03/94). Cela indique qu'un nouveau semis a eu lieu sur ces rizières entre Février et Mars, et qu'elles débutent donc un nouveau cycle de croissance.

On peut donc en déduire qu'entre le mois de Janvier 1994 et le mois de Mars 1994, les rizières précoces ont supporté un cycle complet suivi du début d'un nouveau cycle, alors que les rizières tardives ont supporté uniquement un cycle. Un suivi, de ces champs sur l'année, devrait permettre de déterminer le nombre total de récoltes effectuées sur chaque champ.

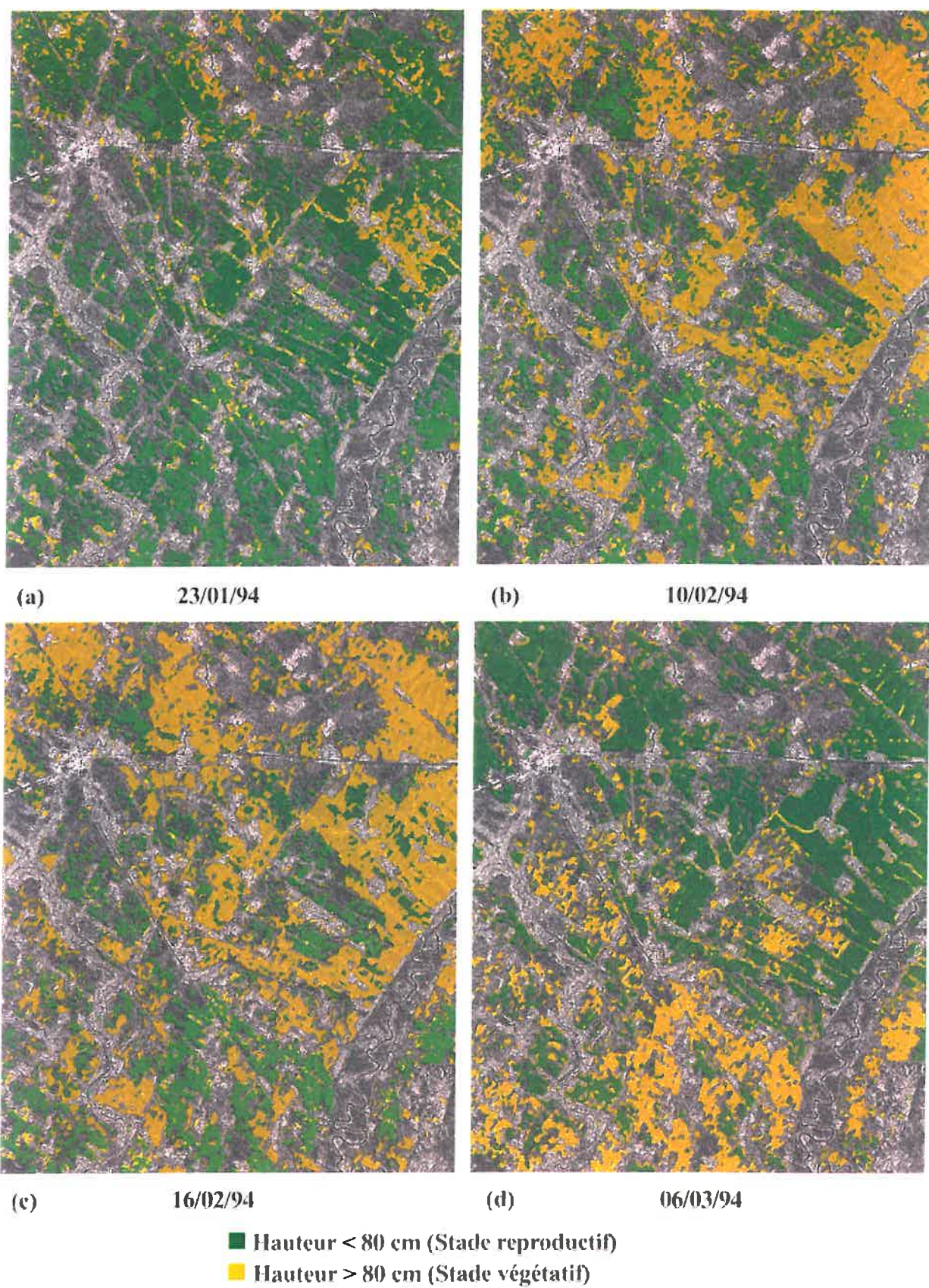


Figure 71 : Carte des classes de hauteur au site de Semarang (ERS)

II -2-2 Cas des données RADARSAT : Carte des Golongans

L'inversion de la rétrodiffusion en paramètres des plantes (hauteur, biomasse) est délicat avec les données RADARSAT. Il est possible d'inverser le σ^0 en âge, hauteur ou biomasse mais seulement dans la partie 40-80 jours ($\sigma^0 < -7$ dB). D'autre part, la phase de saturation du signal radar étant atteinte avant la fin de la phase végétative, la méthode développée pour les données ERS n'est pas applicable aux données RADARSAT. Une possibilité consiste à suivre les cycles de croissance du riz en déterminant quand les champs sont inondés, et en suivant la croissance de la plante.

Sur le site de Jatisari, les rizières sont irriguées depuis le barrage de Jatiluhur. Ces rizières sont regroupées en Golongans : groupes de champs inondés au même moment, et qui suivent le même cycle de croissance. Les champs de riz de la région de Jatiluhur sont regroupés en 4 Golongans, ayant des cycles décalés de 15 jours chacun. De façon à différencier chaque Golongan il est nécessaire d'identifier chaque cycle. La Figure 44 montre les rétrodiffusions temporelles simulées de champs appartenant à différents Golongans. Le moment déterminant pour la caractérisation du Golongan correspond aux jeunes stades de croissance, quand les champs de riz ont une rétrodiffusion particulièrement basse ($\sigma^0 < -10$ dB).

La méthodologie pour la cartographie des Golongans suit 2 étapes :

- 1) *La création de l'image des σ^0* : les zones définies comme riz par la carte riz/non riz, réalisée selon la méthodologie décrite précédemment, sont transformées en σ^0 , pour chacune des images disponibles.
- 2) *La création des cartes des Golongans* : chaque pixel est classé en Golongan selon la date à laquelle il présente sa valeur de rétrodiffusion minimale. Les pixels pour lesquels la rétrodiffusion reste supérieure à -10 dB pour toutes les images, sont classés comme non définis, de façon à ce que seuls les champs étant en début de cycle soient considérés.

La carte des Golongans, sur fond d'image radar (Figure 73) permet de visualiser le résultat. Une estimation quantitative de la précision du résultat n'est cependant pas possible car la carte d'irrigation de la région pour la saison 1996-97 n'a pu être communiquée. Cependant, les résultats présentent une bonne corrélation avec la description du système d'irrigation de la région (Figure 72). L'eau est distribuée du Sud vers le Nord. Les champs appartenant au Golongan I (rouge), qui sont les plus proches du barrage, sont irrigués en premier à la mi-Novembre. Ensuite, l'eau est progressivement distribuée plus au Nord et 2 semaines après, les champs qui appartiennent au Golongan II (bleu) sont inondés, suivis par les champs du Golongan III (vert) inondés à la mi-Décembre et finalement les champs du Golongan IV sont inondés début Janvier (orange). En se

référant à la Figure 72, on s'aperçoit que le Golongan I est déterminé par l'image du 18 Mars 1996, le Golongan II par celle du 18 Novembre 1996, le Golongan III par celle du 12 Décembre 1996 et le Golongan IV par celle du 05 Janvier 1997 (puces gris foncé).

Une remarque doit cependant être apportée : au 18 Mars 1996 le Golongan I se trouve en tout début de cycle. Or, une quinzaine de jours sont nécessaires pour inonder l'ensemble des parcelles d'un même Golongan. Il est donc possible que tous les champs du Golongan I ne soient pas encore inondés à cette date. Au 18 Novembre 1996, ces champs sont encore à un stade précoce de croissance avec une rétrodiffusion inférieure à -10 dB (puce gris clair). Les champs du Golongan I, encore non inondés au 18 Mars 1996, vont donc présenter une rétrodiffusion minimale à la mi-Novembre 1996 et seront donc classés en tant que Golongan II. Ainsi, certains champs classés en Golongan II peuvent en réalité appartenir au premier Golongan. Compte tenu de la répétitivité temporelle de RADARSAT, une image aurait pu être acquise à la fin-Octobre 1996. Elle aurait permis de lever ces incertitudes.

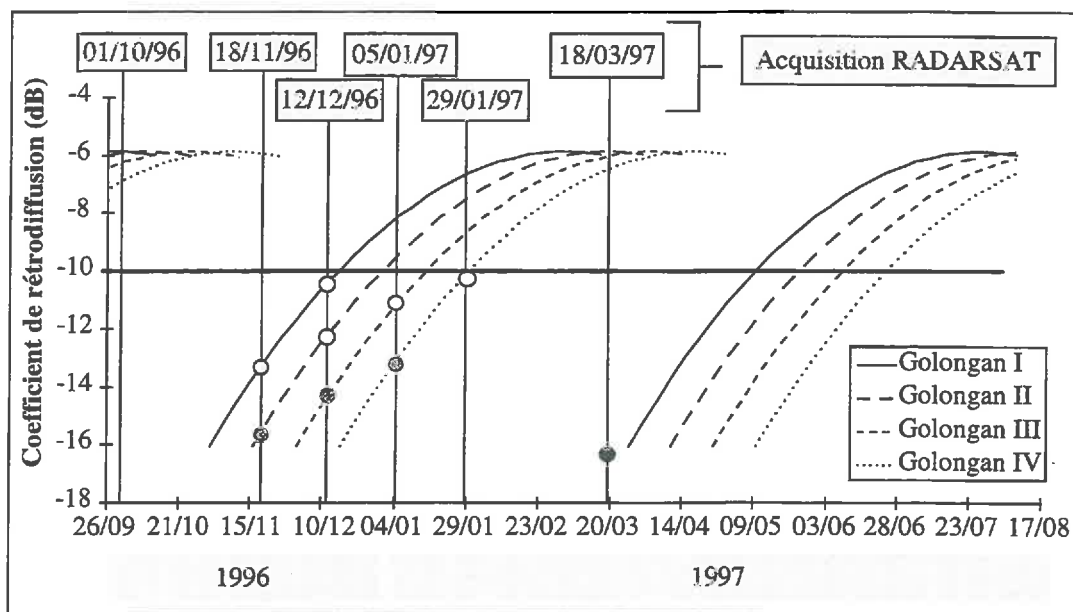
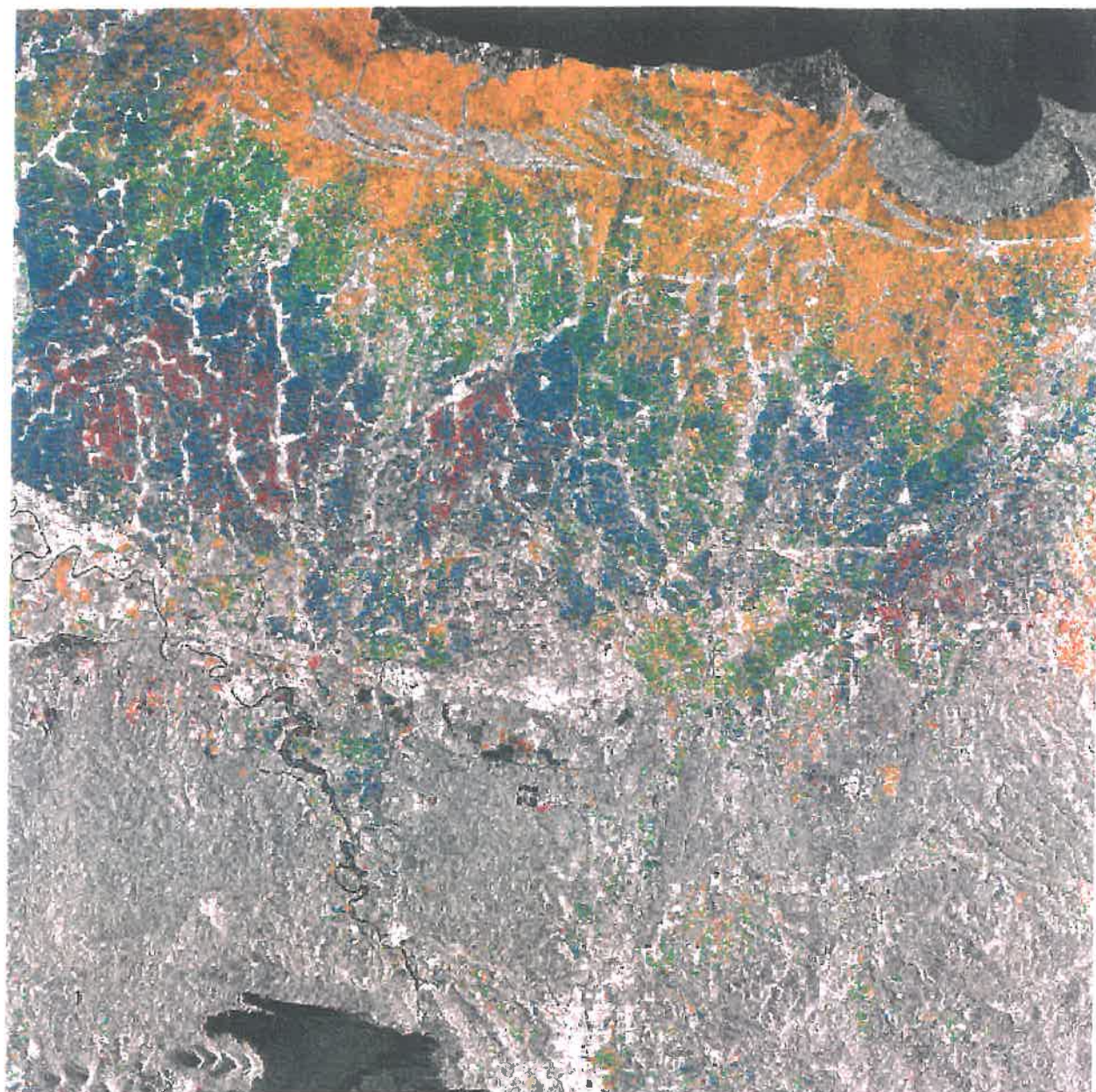


Figure 72 : Simulation de la succession des cultures et détermination des Golongans au site de Jatisari

La carte des Golongans indique quand les différents champs sont inondés. A n'importe quelle date il est donc possible de connaître approximativement l'âge de la culture, et donc, en couvrant l'ensemble de l'année culturale, de déterminer le nombre de cultures par an, pour chaque Golongan et donc chaque champ. D'Octobre 1996 à Mars 1997, on peut donc estimer que les champs du Golongan I ont supporté 2 cultures alors que les champs des Golongans II, III et IV n'en auront supporté qu'une.



■ Golongan I - ■ Golongan II - ■ Golongan III - ■ Golongan IV - ■ Non Riz

Figure 73 : Carte des Golongans du site
de Jatisari (RADARSAT)
50 x 50 km

II -3 Discussion

Les méthodologies de suivi de croissance des plantes tirent partie des caractéristiques de la rétrodiffusion des rizières. Elles ne s'appliquent qu'aux pixels préalablement classés en riz. Elles ont pour objectif de déterminer le nombre de récoltes par an, mais aussi, permettre de suivre qualitativement la croissance des plantes.

Pour les données ERS, l'inversion des σ^0 en classes de hauteur permet de connaître le stade de développement approximatif de la culture. Pour les données RADARSAT, la haute répétitivité temporelle du capteur permet de déterminer les dates de mise en eau des parcelles.

La méthodologie adaptée aux données ERS nécessite 2 acquisitions par cycle de croissance : une durant le stade végétatif et une autre durant le stade reproductif. Ainsi, le suivi du champ, de la phase végétative à la phase reproductrice est possible. Si on prend en compte le délai de 6 semaines qui peut exister entre les cultures tardives et précoces, le nombre de dates nécessaire par cycle est de 3 dates. Ces contraintes correspondent à celles de la cartographie des rizières. Le suivi de croissance avec les données ERS ne nécessite donc pas l'acquisition de dates supplémentaires à celles acquises pour la cartographie.

Pour les données RADARSAT, une date par Golongan est nécessaire pour déterminer la date de mise eau de chacun des Golongans. Le nombre de dates dépend donc de la zone étudiée. Dans le cas de Jatisari, 2 x 4 dates sont nécessaires avec un intervalle de 24 jours. Le nombre de dates nécessaire pour la cartographie des rizières étant de 3 tous les 48 jours, le suivi des rizières à l'aide des données RADARSAT va donc nécessiter un nombre supplémentaire de dates, notamment en début de cycle. Si les rizières ne sont pas cultivées en Golongans, cette méthode permet de séparer les champs en groupes homogènes. Ces groupes seront d'autant plus homogènes, et donc leur suivi plus précis, que le nombre de dates acquises durant la première partie du cycle de croissance ($\sigma^0 < 10$ dB) sera important.

Les relations utilisées pour l'inversion en paramètres des données ERS prennent en compte les jeux de données du Japon (région tempérée) et d'Indonésie (région tropicale). Ainsi, la courbe expérimentale utilisée semble robuste puisqu'elle est adaptée à des conditions culturelles très différentes. Cependant, il est important de tester cette relation sur d'autres sites afin de la valider sur une plus large échelle.

La méthodologie utilisée pour les données RADARSAT dépend fortement de la période durant laquelle il est intéressant d'acquérir des images pour localiser les Golongans, c'est à dire durant laquelle les champs ont une rétrodiffusion inférieure à -10 dB. Pour un cycle donné, la plante met environ 50 jours pour atteindre ce niveau de rétrodiffusion. Cependant, certaines méthodes culturales risquent de limiter cette méthodologie, notamment les semis sur sol sec qui, en tout début de cycle auront une rétrodiffusion très variable selon la rugosité et l'humidité du sol. Dans ce cas, l'estimation de la mise en eau sera décalée dans le temps. Ceci est relativement peu limitant en terme de détermination du nombre de récoltes par an, mais plus en terme de suivi de croissance.

Contrairement à la cartographie, il est possible, en cas de problème d'acquisition d'images, de combiner des images acquises en mode orbital descendant et en mode orbital ascendant.

Dans le cas des rizières pluviales, il paraît difficile d'espérer suivre la croissance de la plante. En début de cycle, la culture n'est généralement pas inondée, et le signal résulte principalement des caractéristiques du sol. Ensuite, au cours du cycle, le niveau fluctue et il est donc impossible de retrouver les paramètres tels que la haute des plantes, ni de déterminer une date de mise en eau. D'autres études doivent être menées pour permettre de développer des méthodes de suivi de croissance des rizières pluviales.

III - PREVISION DES RENDEMENTS

Le dernier paramètre indispensable pour déterminer la production annuelle des rizières est le rendement final de chaque récolte. Une méthode permettant d'estimer ce paramètre présente donc un intérêt majeur. L'idée est de coupler les données de télédétection avec un modèle de production de riz. Pour cela, une description des modèles existants ainsi que la méthode de couplage seront présentées dans ce chapitre.

III -1 Analyse du problème

Les travaux concernant l'estimation des rendements des cultures à partir de données de télédétection ont surtout été menés en utilisant les données optiques et concernent des cultures telles que le maïs, le blé ou le soja. Peu d'études ont porté sur le riz. On peut citer les travaux de Shibayama et Akiyama., 1986 ; Watanabe, 1988 ; Leblon et al., 1991 ; Murthy et al., 1996 et Inoue, 1997. Concernant l'estimation des rendements à partir des données de télédétection optiques, deux types d'approches ont été développées (Moran et al., 1997) :

- 1) Utiliser des données de télédétection, acquises tard dans le cycle de croissance, de façon à déterminer les rendements des cultures avec des approches telles que des régressions (Murthy et al., 1996).
- 2) Combiner les informations de télédétection avec des modèles de croissance ou des modèles météorologiques de façon à prédire le rendement final (Inoue, 1997).

Notre objectif étant la prédiction du rendement, la première approche présente moins d'intérêt car elle ne permet d'estimer le rendement que tard dans la saison. Dans la deuxième approche, les données de télédétection sont généralement utilisées en tant que paramètres d'entrée des modèles, tels que l'indice foliaire (LAI) - (Running et al., 1989) - ou le taux de couverture végétale. Le taux de croissance est alors calculé en utilisant les données météorologiques à travers la conversion de l'énergie solaire en biomasse (Wiegand et al., 1986). Une autre approche consiste à utiliser des valeurs instantanées - de LAI par exemple - dérivées des données de télédétection, de façon à ré-initialiser ou re-paramétriser le modèle et améliorer les prédictions du rendement (Bouman, 1992 ; Moran et al., 1995 ; Inoue, 1997). Cette dernière approche présente l'avantage de nécessiter moins de données de télédétection car le modèle étalonné est utilisé pour estimer la croissance de la plante lorsque les données de télédétection ne sont pas disponibles. Cependant, certains paramètres doivent être acquis plusieurs fois par cycle et par champs pour permettre une estimation précise.

La méthodologie proposée pour l'estimation du rendement des rizières va donc consister à coupler les données satellites radar avec un modèle de production de riz. Le principe est d'estimer certains paramètres d'entrée du modèle à partir des données de télédétection et ainsi, de simuler à l'aide de ce modèle, la croissance de la plante, jusqu'au stade de maturité physiologique (Ribbes et Le Toan, 1998b). Les résultats expérimentaux et théoriques obtenus et décrits dans la partie II ont montré que les paramètres des plantes pouvant être estimés à partir de la rétrodiffusion radar des rizières sont l'âge, la hauteur et la biomasse. Un premier travail consiste donc à répertorier et analyser les modèles de production de riz existants afin de sélectionner celui qui correspond le mieux à nos besoins et à nos données. Une deuxième étape consiste à étalonner le modèle à l'aide des données de télédétection. Dans un troisième temps, le modèle est utilisé pour simuler la croissance des plantes à l'aide des paramètres estimés à partir des données radar. Enfin, les résultats de ces simulations (nombre de grains par hectare, biomasse, rendement) seront validés par comparaison avec les mesures de production réalisées sur le terrain.

Ces travaux reposent sur les données issues de sites tropicaux (Indonésie) et tempérés (Japon). Les sites indonésiens prennent en compte à la fois les rizières de culture intensive de la plaine de Jatiluhur et les rizières très hétérogènes de Semarang. Ainsi, différentes conditions culturelles et climatiques sont considérées. Les sites de Jatisari et Semarang ont été décrits dans la partie précédente. Au site de Jatisari, le rendement final n'est pas connu, mais le nombre de grains par panicule a été mesuré. Au site de Semarang, le rendement final est connu pour certains champs qui présentent des caractéristiques de production très différentes. Des données climatiques journalières, fournies par le bureau météorologique et géophysique indonésien, ont été acquises pour les années 1993-1994 à la station climatique de Semarang et pour les années 1996-1997 à la station climatique de Jatisari.

Inoue (1997) a effectué une série de mesures sur des champs expérimentaux du National Institute of Agro-Environmental Sciences (NIAES) du Japon, au site de Tsukuba (Figure 11). Ces mesures ont été réalisées dans le cadre d'une étude portant sur l'estimation du LAI et de la biomasse des plantes de riz à partir d'un radiomètre portable opérant dans des longueurs d'onde allant du visible au moyen infrarouge. Nous avons pu bénéficier du jeu de données de terrain issu de cette campagne de mesures, qui comprend notamment des valeurs de biomasse aérienne totale des plantes mais également le détail du poids des feuilles, tiges et panicules tout au long du cycle de croissance, mesurés à raison d'une fois par semaine durant la saison de Juin à Septembre 1994. La variété cultivée (Nipponbare - *Oryza sativa japonica*) complète son cycle en 150 jours. En fin de cycle, la valeur du rendement final a été mesurée. Enfin, des données climatiques journalières ont également été acquises durant cette période. Ces données seront utilisées pour valider les méthodes d'étalonnage du modèle de production de riz.

III-2 Choix du modèle de production

III-2-1 Les modèles de production de riz

Les modèles de production de riz simulent généralement la croissance journalière et les taux de développement de la culture à partir de paramètres météorologiques tels que le rayonnement solaire, les températures minimum et maximum, les précipitations, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. Ces modèles décrivent les principaux processus de croissance et de développement de la plante tels que le calendrier phénologique, l'interception lumineuse, la photosynthèse, la respiration de maintenance et de croissance et l'allocation de matière sèche. Ils diffèrent dans la façon dont ces différents processus sont calculés et dans la manière dont les effets de la température et du rayonnement solaire sont pris en compte.

Différents modèles de production de riz ont été développés au cours des années passées, principalement pour décrire les effets des changements climatiques sur la production du riz. Le GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystem) Rice Network a référencé 6 modèles de production du riz (Ingram, 1994) qui peuvent être séparés en 3 groupes :

- 1- Les modèles de fonctionnement empiriques : ils utilisent des relations linéaires entre les systèmes de croissance du riz et l'indice de surface foliaire (LAI), et supposent que la croissance de la biomasse est proportionnelle au rayonnement solaire intercepté (Kobayashi, 1994). Ces modèles simulent la croissance des cultures annuelles telles que le riz, et calculent des valeurs de biomasse totale et de rendement à maturité. L'objectif de ces modèles est de récapituler les données expérimentales ou les sorties de modèles plus complexes, mais ils ne sont pas réellement adaptés à la simulation de la croissance du riz car plusieurs processus physiques, chimiques et biologiques sont mélangés dans les paramètres du modèle.
- 2- Les modèles de fonctionnement simplifiés : ces modèles utilisent des relations simples entre l'interception de la lumière et le LAI et décrivent seulement - par l'intermédiaire d'un indice de maturité - le partitionnement de la matière sèche à travers les grains à maturité. Le partitionnement des feuilles et des tiges n'est pas du tout considéré. Dans ce groupe, se trouvent le modèle SIMRIW (Simulation Model for Rice-Weather relations) (Horie, 1987) et le modèle TRYM (Temperate Rice Yield Model) (Mitchell, 1996). Le modèle SIMRIW peut être appliqué au riz irrigué et a été validé au Japon (Horie et al., 1995). Si l'on considère que le riz est principalement produit dans les régions tropicales, le modèle TRYM correspond moins à nos besoins car il simule la croissance du riz uniquement en milieu tempéré.

3- Les modèles de fonctionnement mécanistes : ces modèles simulent l'interception du rayonnement solaire et la photosynthèse à un pas de temps journalier et calculent l'allocation de la matière sèche en fonction du stade de développement. Les modèles CERES-Rice (Singh et al., 1993) et ORYZA 1 (Kropff et al., 1994) appartiennent à ce groupe. Le modèle RICAM V1.0 (Rice growth Calendar Model), lui aussi modèle détaillé, n'a pour l'instant été testé qu'en Chine (Yin et Qi, 1994) et n'a fait l'objet que de peu de documentation.

En 1996, Mitchell a mené une étude comparative entre les modèles CERES-Rice, ORYZA 1 et SIMRIW, afin de déterminer l'aptitude de chacun des modèles à estimer les rendements. Le résultat de ces travaux montre que le modèle ORYZA estime le rendement avec la meilleure précision : $\pm 0,6$ t/ha soit moins de 6% d'erreur pour un rendement de 9,8 t/ha, contre 22% pour SIMRIW ($\pm 1,3$ t/ha) et 15% pour CERES-Rice ($\pm 0,8$ t/ha). Cependant, Horie et al. (1995) ont obtenu, au Japon, des résultats légèrement meilleurs avec SIMRIW qu'avec ORYZA. Inoue (1997) a également utilisé le modèle SIMRIW pour la simulation de la croissance du riz au site de Tsukuba, au Japon. Cependant, le modèle ORYZA a été validé sur plusieurs sites en Inde (Mohandass et al., 1995), en Malaisie (Singh et al., 1995), en Corée du Sud (Shin et Lee, 1995), en Chine (Defeng et Shaokai, 1995), et aux Philippines (Centeno et al., 1995), pour plusieurs variétés et différentes conditions de cultures.

Le modèle ORYZA apparaît donc comme le plus approprié à notre étude car il a été validé largement en Asie, ce qui est important dans un souci de développer des méthodes applicables à n'importe quel site.

III -2-2 Le modèle ORYZA 1

ORYZA 1 est un modèle éco-physiologique pour le riz irrigué, qui décrit la croissance et détermine la production potentielle du riz. Il est basé sur les modèles SUCROS (Spitter et al., 1989 ; van Laar et al., 1992), MACROS (Penning de Vries et al., 1989), INTERCOM (Kropff et van Laar, 1993) et GUMCAS (Matthews et Hunt, 1994). Il permet de calculer des rendements réalistes car il simule la photosynthèse des feuilles de façon quotidienne. Le modèle ORYZA considère les mécanismes au niveau des feuilles et les intègre sur la canopée pour obtenir les valeurs au niveau de la culture. Les principaux facteurs qui déterminent le taux de croissance pour un jour donné sont, pour des conditions de croissance favorables (fertilisation suffisante, pas de maladie), la lumière, la température et les caractéristiques variétales pour les processus phénologiques et morphologiques. Le modèle calcule des taux journaliers de production de matière sèche des différents organes de la plante, le taux de développement surfacique des feuilles et le taux de développement phénologique. En intégrant ces taux dans le temps, la production de matière sèche de la culture est simulée durant le cycle de croissance. Le pas de temps d'intégration est journalier. La Figure 74 schématise le fonctionnement du modèle.

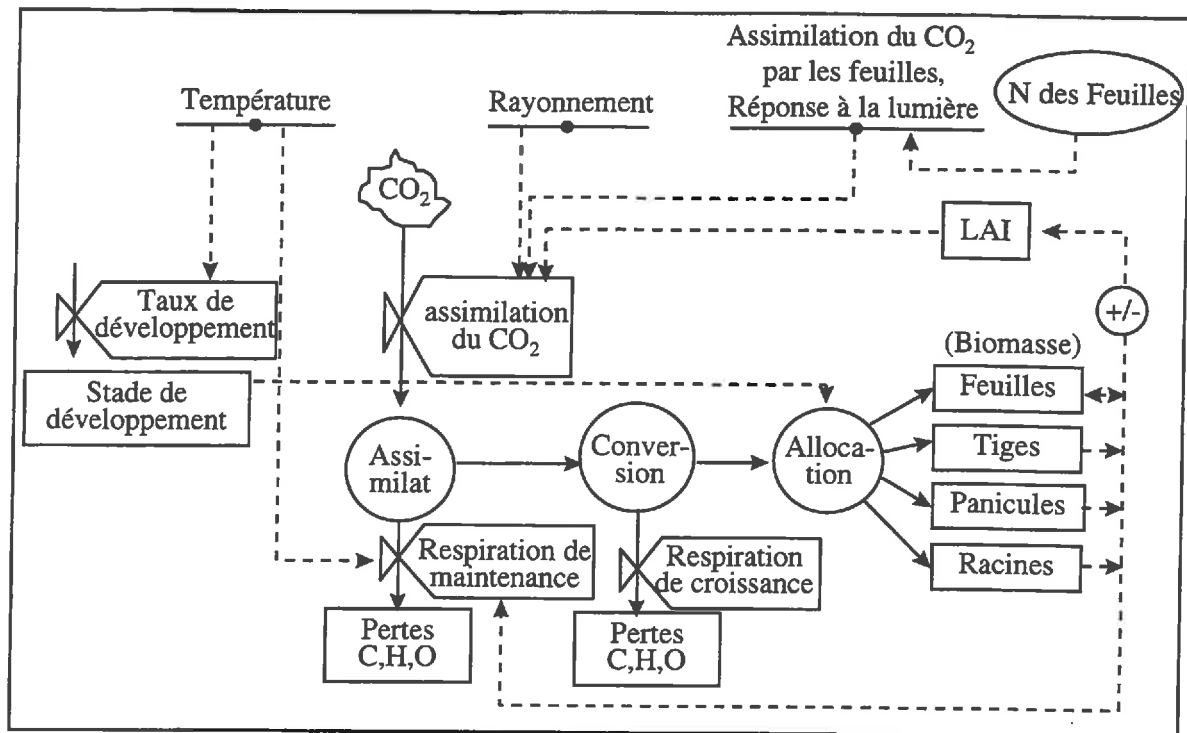


Figure 74 : Schéma de fonctionnement du modèle ORYZA (source : Kropff et al., 1994)

1- Développement phénologique de la culture

Le stade de développement d'une plante (DVS) définit son âge physiologique. Il est décrit en utilisant une variable sans dimension qui est égale à zéro à l'émergence, 1 à la floraison et 2 à maturité. Le taux de développement phénologique (DVR) est principalement dépendant de la température moyenne journalière, mais la photopériode peut également induire la floraison pour les variétés sensibles. Le cycle de croissance du riz est divisé en 4 phases phénologiques : 1) la phase végétative de base ($0 < \text{DVS} < 0,4$) du semis au début de la phase de sensibilité à la photopériode, 2) la phase de sensibilité à la photopériode ($0,4 < \text{DVS} < 0,65$) qui dure jusqu'à l'initiation florale et durant laquelle le taux de développement est influencé par la longueur du jour, 3) la phase de formation paniculaire du début du stade reproductif jusqu'au stade 50% floraison ($0,65 < \text{DVS} < 1$) et 4) la phase de maturation des grains ($1 < \text{DVS} < 2$), du stade 50% floraison à la maturité physiologique. Le rendement final est celui estimé au stade de maturité physiologique. Les différences observées dans la durée des cycles de croissance de différentes variétés sont principalement dues aux différences de durée de la phase végétative de base (Vergara et Chang, 1985). Le DVS résulte de l'intégration des taux de développement au cours du temps et est exprimé en degré-jours. Le DVR dépend de la phase phénologique à laquelle il correspond.

De plus, le modèle considère trois seuils de température : une température de base (8°C), et une température maximum (42°C) au delà desquelles le DVR est nul et une température optimale (30°C) pour laquelle le DVR est maximum (Kiniry et al., 1991). Pour le riz repiqué, ORYZA tient également compte du choc causé par le repiquage qui provoque un délai dans le développement phénologique de la plante. Enfin, pour les environnements tempérés, où la culture sous serre est fréquente, l'effet de la température est pris en compte.

2- Production journalière de matière sèche

Dans un premier temps l'assimilation du CO_2 par la canopée est calculée à partir du rayonnement incident journalier, de la température moyenne de l'air et du LAI. Si le LAI n'est pas connu, il peut être simulé, en fonction de la température aux jeunes stades, et de la croissance des feuilles aux stades plus âgés. Le taux journalier d'assimilation du CO_2 est calculé à partir de l'intégration du LAI sur la canopée et sur le jour. Les respirations de maintenance et de croissance sont ensuite prises en compte par un coefficient qui convertit la lumière interceptée en matière sèche. Le taux journalier de croissance nette résulte alors de la soustraction entre les besoins de respiration et le taux d'assimilation du CO_2 . Enfin la matière sèche produite est distribuée aux différents organes de la plante (k) à partir des coefficients d'allocation d'assimilat (pc_k) qui dépendent du stade de développement (DVS) (21) :

$$pc_k = f(DVS) \quad (21)$$

La matière sèche est d'abord distribuée à travers la partie aérienne et la partie souterraine (racine), puis de la partie aérienne aux tiges, feuilles et panicules. Le taux de croissance des organes k de la plante (G_k) devient (avec G_p = taux de croissance potentielle totale et pc_k = fraction allouée aux organes k) (22):

$$G_k = G_p \times pc_k \quad (22)$$

Ces fonctions d'allocation de la matière sèche (20) sont particulièrement stables quelle que soit la variété de riz considérée (Kropff et al., 1993). Les modèles CERES-Rice et RICAM considèrent également que l'allocation de la matière sèche dépend du stade de développement. Finalement le poids sec total des organes des plantes est obtenu en intégrant leur taux de croissance journalier sur le temps. Le processus de maturation des grains est initié lorsque $DVS > 1$. Le poids sec des grains de riz est alors calculé à partir du poids sec des panicules, de la teneur en grain de la panicule (0,86-0,90) et de la teneur en eau des grains (14%).

3- Paramètres d'entrée et de sortie du modèle

De nombreux paramètres utilisés dans le modèle varient peu entre les géotypes de riz. Les paramètres d'entrée du modèle sont les suivants :

- Latitude géographique,
- Données climatiques journalières (rayonnement solaire, températures minimale et maximale de l'air),
- Densité de plantation (nombre de touffes par m², nombre de plantes par touffe)
- Dates de semis et de repiquage,
- Paramètres qui décrivent les caractéristiques morphologiques du riz (durée des 4 phases phénologiques, tables d'allocation de la matière sèche pour les différents organes).

Pour estimer le rendement potentiel d'une culture, un taux optimal d'azote des feuilles peut être utilisé (Kropff et al., 1995) : 110 kg N ha⁻¹ pour la saison humide et 225 kg N ha⁻¹ pour la saison sèche. Tous les paramètres d'entrée n'ont pas la même importance selon l'environnement dans lequel le riz est cultivé. Par exemple, la connaissance précise de la date de semis est plus cruciale en milieu tempéré où les températures sont un facteur de contrainte. De plus ce modèle présente l'avantage de permettre d'affiner l'estimation du rendement si des informations supplémentaires sont disponibles telles que certaines caractéristiques variétales ou culturales, ou la teneur en azote des feuilles. Outre la fertilisation azotée, d'autres facteurs peuvent affecter la production de biomasse ou le rendement tels notamment que la présence de ravageurs, de maladies ou de mauvaises herbes. Cependant, le modèle ORYZA ne prend pas en compte ces éléments.

La principale variable de sortie du modèle est le rendement final (poids sec des grains de riz) exprimé en kg.ha⁻¹. ORYZA permet également de suivre l'évolution de la biomasse de la partie aérienne de la plante ou des différents organes, le LAI, les taux de croissance, l'allocation de la matière sèche, le nombre de grains, l'assimilation du CO₂, ou encore la quantité de rayonnement absorbée par la plante.

III -3 Etalonnage du modèle

La méthodologie consiste à utiliser les données radar pour simuler, à l'aide du modèle ORYZA, la croissance de la plante et ainsi, estimer le rendement final.

Pour cela certains paramètres d'entrée du modèle vont devoir être estimés à partir des données radar et d'autres, si possible, fixés à des valeurs standards, dans la mesure où ils varient peu ou influent peu sur l'estimation du rendement final.

Deux paramètres peuvent être dérivés des données radar : la date de semis (via la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'âge de la plante) et la biomasse aérienne totale de la plante aux dates d'acquisition des images.

III -3-1 Pratiques culturales

Les paramètres décrivant les pratiques culturales doivent être déterminés à partir de mesures de terrain ou de connaissances du site car ils sont difficiles à estimer. Cependant, si ces paramètres ne sont pas connus, des données standards issues de la littérature (Coyaud, 1950 ; Dobelmann, 1976) peuvent être utilisées :

- Nombre de plantes par touffe : $NPLH = 5 \pm 5$
- Nombre de touffes par m^2 : $NH = 20 \pm 10$
- Nombre de jours entre le semis et le repiquage : $NTR = 25 \pm 5$

De plus, pour estimer le rendement avant la récolte, la durée totale du cycle, qui varie peu d'une année sur l'autre si la même variété est utilisée, est supposée connue.

III -3-2 Développement phénologique

De façon à déterminer les taux de développement durant les différents stades phénologiques, la connaissance du calendrier de la culture est nécessaire : date de semis (DOYS), date de repiquage (DOYTR), date de l'initiation florale (DOYPI), floraison (DOYFL) et date de maturité physiologique (DOYPM), exprimés en jours Juliens. Les variétés de riz diffèrent par la durée de leur cycle végétatif alors que celui de leur cycle

Phases phénologiques	Variété tropicale (IRRI, 1993) Jours	Philippines (Kropff et al., 1994) Jours	Japon (Inoue, 1997) Jours
Semis - Initiation florale	55	41	80
Initiation florale - floraison	35	35	35
Floraison - Maturité physiologique	30	30	30
Durée totale du cycle	120	106	145

Tableau 12 : Durées des différentes phases phénologiques pour des cultures ayant des cycles de croissance différents

reproductif reste constant. Par exemple, de manière générale, pour une variété de 120 jours, plantée dans un environnement tropical, l'initiation florale débute 55 jours après semis, suivie, 35 jours après par la floraison et enfin la phase floraison-maturité physiologique dure 30 jours de plus (IRRI, 1993). La durée qui varie entre les variétés est celle entre le semis et l'initiation florale. Le Tableau 12 confirme cette hypothèse : les cultures ayant un cycle de croissance variant de 106 à 140 jours ont des phases initiation florale - floraison et floraison - maturité qui ont une durée constante (35 et 30 jours respectivement). Au contraire, la phase semis - initiation florale varie de 41 à 80 jours.

Ainsi, les différentes dates du calendrier cultural peuvent être estimées de la façon suivante :

- Date de semis = $f(\sigma^o)$
- DOYTR = DOYS+NTR avec NTR = 25 si non connu
- DOYPI = Durée totale du cycle - (DOYS+35+30)
- DOYFL=DOYS+DOYPI
- DOYPM=DOYS+DOYFL

Une fois que les taux de développement des différentes phases sont calculés, il est possible de transformer les dates pour lesquelles les informations de biomasse sont connues, en stade de développement DVS de la plante.

III -3-3 Production journalière de matière sèche

Dans le modèle, la matière sèche distribuée à travers les organes de la plante est estimée en utilisant les tables d'allocation composées pour chaque organe, de fractions de la croissance de matière sèche journalière totale. De façon à étalonner le modèle, les valeurs de biomasse aérienne totale doivent d'abord être distribuées à travers les feuilles, les tiges et les panicules en utilisant les coefficients d'allocation de la matière sèche (pc_k). Kropff et al. (1993) ont observé que ces coefficients étaient constants pour un stade de développement donné quelles que soient les variétés considérées.

Les fonctions d'allocation théoriques de la matière sèche ont été déterminées à partir de résultats de simulation du poids sec des tiges, des feuilles et des panicules. La simulation a été réalisée à partir d'un jeu de paramètres précis et détaillé, mesuré aux Philippines par Kropff et al. (1994). Le cycle de croissance a été divisé en phase pré-épiaison (DVS<0,8) durant laquelle le poids des panicules reste nul, et en phase post-épiaison (DVS>0,8).

De plus, pour assurer que la somme des coefficients ($pc_{feuille} + pc_{tige} + pc_{panicule}$) est toujours égale à 1, pc_{tige} sera calculé par la relation (23) :

$$pc_{stem} = 1 - (pc_{feuille} + pc_{panicule}) \quad (23)$$

La validité de ces équations a été testée sur le site tempéré de Tsukuba, au Japon qui présente des caractéristiques culturales différentes de celles des Philippines. A Tsukuba, la biomasse sèche aérienne totale, ainsi que le détail du poids sec des tiges, des feuilles et des panicules, ont été mesurés tout au long du cycle de croissance, de Mars à Septembre 1994. Après avoir converti les dates de collecte des données en stade de développement (DVS), le poids sec des différents organes a été calculé à partir de la biomasse aérienne totale selon les fonctions d'allocation et de l'approximation (23) décrites précédemment.

La Figure 75 présente la variation du coefficient d'allocation pc_k en fonction du stade de développement (DVS) exprimé en %, pour les différents organes. Les courbes représentent les fonctions d'allocation théoriques dérivées des données de Kropff et al. (1994) et les points, les coefficients d'allocation calculés à partir des mesures réalisées sur le site de Tsukuba. Pour les stades pré-épipaison (Figure 75a), un coefficient de corrélation $r^2=0,95$ (erreur de 5%) a été obtenu pour l'ensemble des organes. Pour les stades post-épipaison (Figure 75b), des corrélations r^2 de 0,96, 0,92 et 0,94 ont été obtenues respectivement pour les feuilles, les tiges et les panicules, ce qui correspond à des erreurs de 4%, 8% et 6%.

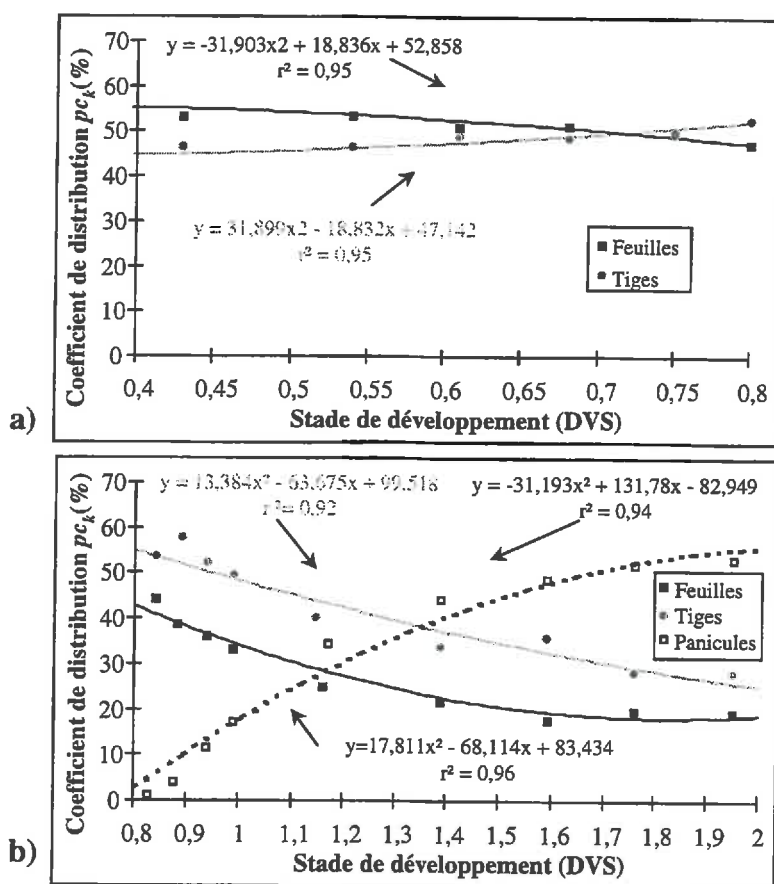


Figure 75 : Evolution des coefficients d'allocation pc_k (%) en fonction du stade de développement (DVS) Comparaison entre la fonction d'allocation théorique et les coefficients calculés à partir des poids secs mesurés sur le site de Tsukuba.

Une fois que la biomasse aérienne totale des plantes est allouée aux différents organes, il est possible de construire les tables d'allocation des différents organes, qui pourront être utilisées comme paramètres d'entrée du modèle. Ces tables sont composées de fractions qui relient, pour une période donnée (durée entre deux dates d'acquisition), le DVS moyen (24) au rapport entre la croissance en biomasse par organe et la croissance en biomasse aérienne totale (25) :

$$(24) = \frac{DVS_{ti} + DVS_{ti+1}}{2} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} ti = i^{\text{ème}} \text{ date de collecte des données, } ti+1=(i+1)^{\text{ème}} \\ \text{date de collecte des données} \end{array}$$

$$(25) = \frac{G_{k,ti+1} - G_{k,ti}}{G_{tot,ti+1} - G_{tot,ti}} \quad \begin{array}{l} G_{tot} = \text{biomasse aérienne totale} \\ G_k = \text{quantité de biomasse allouée à l'organe } k \end{array}$$

Input	Tsukuba -1994	Cikalongsari- 1996	Jatisari - 1996
Date de semis (DOYS) *	130	291	294
Date de repiquage (DOYTR) *	153	318	321
Date de l'initiation florale (DOYPI) *	210	361	364
Date de floraison (DOYFL) *	245	396	399
Date de maturité (DOYPM) *	275	426	429
Nombre de plantes / touffes (NPLH)	3	5	5
Nombre de touffes / m ² (NH)	26	16	16
Tsukuba			
Table d'allocation de la matière sèche pour les feuilles :			
FLVTB = 0.,0.5, 0.26,0.56, 0.39,0.54, 0.55,0.48, 0.72,0.39, 0.86,0.09, 1.41,0.0, 2.0,0.0			
Table d'allocation de la matière sèche pour les tiges :			
FSTTB = 0.,0.5, 0.26,0.44, 0.39,0.46, 0.55,0.52, 0.72,0.61, 0.86,0.52, 1.41,0.0, 2.0,0.0			
Table d'allocation de la matière sèche pour les panicules :			
FSOTB = 0.,0.0, 0.26,0.00, 0.39,0.00, 0.55,0.00, 0.72,0.00, 0.86,0.39, 1.41,1.0, 2.0,1.0			
Cikalongsari			
FLVTB = 0.0,0.5, 0.60,0.47, 0.84,0.23, 1.40,0.07, 2.0,0.0			
FSTTB = 0.0,0.5, 0.60,0.53, 0.84,0.52, 1.40,0.11, 2.0,0.0			
FSOTB = 0.0,0.0, 0.60,0.00, 0.84,0.25, 1.40,0.82, 2.0,1.0			
Jatisari			
FLVTB = 0.,0.5, 0.56,0.50, 0.82,0.29, 1.35,0.04, 2.0,0.0			
FSTTB = 0.,0.5, 0.56,0.50, 0.82,0.53, 1.35,0.08, 2.0,0.0			
FSOTB = 0.,0.0, 0.56,0.00, 0.82,0.18, 1.35,0.88, 2.0,1.0			

* Exprimé en jours julien

Tableau 13 : Paramètres d'entrée pour la validation du modèle

De façon à déterminer si la durée des phases phénologiques et les tables d'allocation de la biomasse sont bien estimées par les méthodologies décrites précédemment, des simulations ont été réalisées en utilisant seulement les informations de pratiques culturales (NTR, NPLH et NH), la date de semis, la durée totale du cycle et les valeurs de biomasse aérienne totale mesurées sur les sites de Tsukuba au Japon et de Jatisari en Indonésie. Les paramètres décrits dans le Tableau 13 ont été utilisés. Les Figures 76a-c montrent que les valeurs simulées de biomasse aérienne totale et de poids sec des panicules correspondent bien à celles mesurées sur le terrain. Pour les deux champs du site de Jatisari (Cikalongsari et Jatisari), le nombre de grains/ha simulé a été comparé à celui mesuré sur le terrain (Figure 77a,b). Des déviations inférieures à 5% ont été obtenues. Pour le site de Tsukuba (Figure 78), le rendement final simulé a pu être comparé au rendement mesuré sur le terrain après la récolte. L'estimation du rendement a été donnée avec une erreur inférieure à 7% (0,4 t/ha).

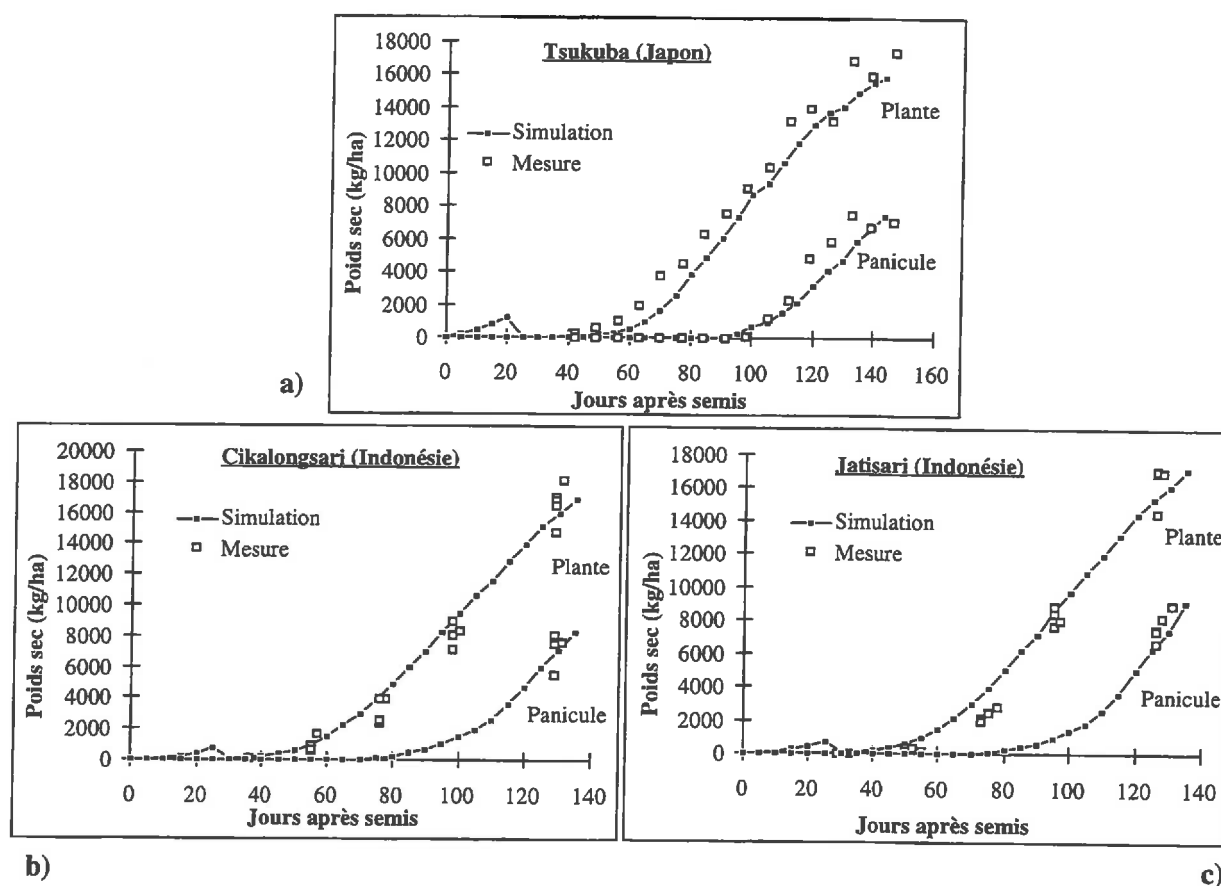


Figure 76 : Comparaison entre les biomasses totales de la plante et de la panicule simulées et mesurées. Les simulations ont été réalisées avec le modèle ORYZA en utilisant les informations de pratiques culturales, les dates de semis, et les valeurs de biomasse aérienne totale collectées aux sites de (a) Tsukuba, (b) Cikalongsari et (c) Jatisari comme paramètres d'entrée.

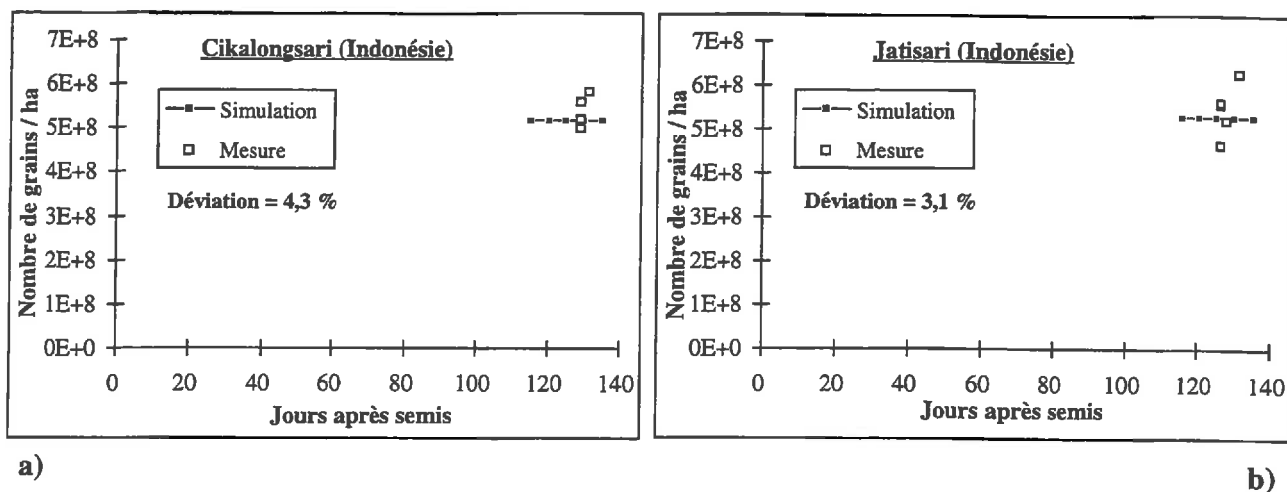


Figure 77 : Comparaison entre les simulations et les mesures du nombre de grains par ha. Les simulations ont été réalisées en utilisant les informations de pratiques culturales, les dates de semis et les valeurs de biomasse aérienne totale collectées sur les champs de (a) Cikalongsari et (b) Jatisari comme paramètres d'entrée du modèle ORYZA.

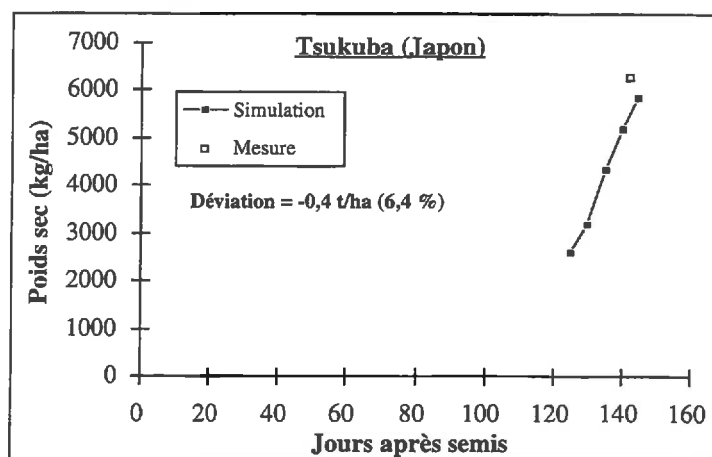


Figure 78 : Comparaison entre le rendement final mesuré et simulé (poids sec des grains de riz - kg/ha). Les simulations ont été réalisées en utilisant les informations de pratiques culturales, les dates de semis et les valeurs de biomasse aérienne totale collectées au site de Tsukuba comme paramètre d'entrée du modèle ORYZA.

Les méthodes d'estimation de la durée des différentes phases phénologiques et du calcul des tables d'allocation des différents organes sont donc validées.

De façon à déterminer l'erreur induite par l'utilisation de paramètres de culture standards (NPLH, NH, NTR), des simulations ont été réalisées sur les sites de Tsukuba, Cikalongsari et de Jatisari en remplaçant la durée entre le semis et le repiquage, le nombre de plantes par touffe et le nombre de touffes par m² par les valeurs standards proposées (respectivement 25 jours, 20, et 5 m⁻²). La Figure 79a-c présente le résultat de ces simulations, comparé aux mesures de biomasse mesurées sur les différents champs. L'erreur commise sur l'estimation du rendement, en utilisant les paramètres de culture standards, est inférieure à 0,1 t/ha (1,5%). Si ces paramètres ne sont pas connus, il peuvent donc être remplacés par ces valeurs standards, sans trop affecter l'estimation du rendement.

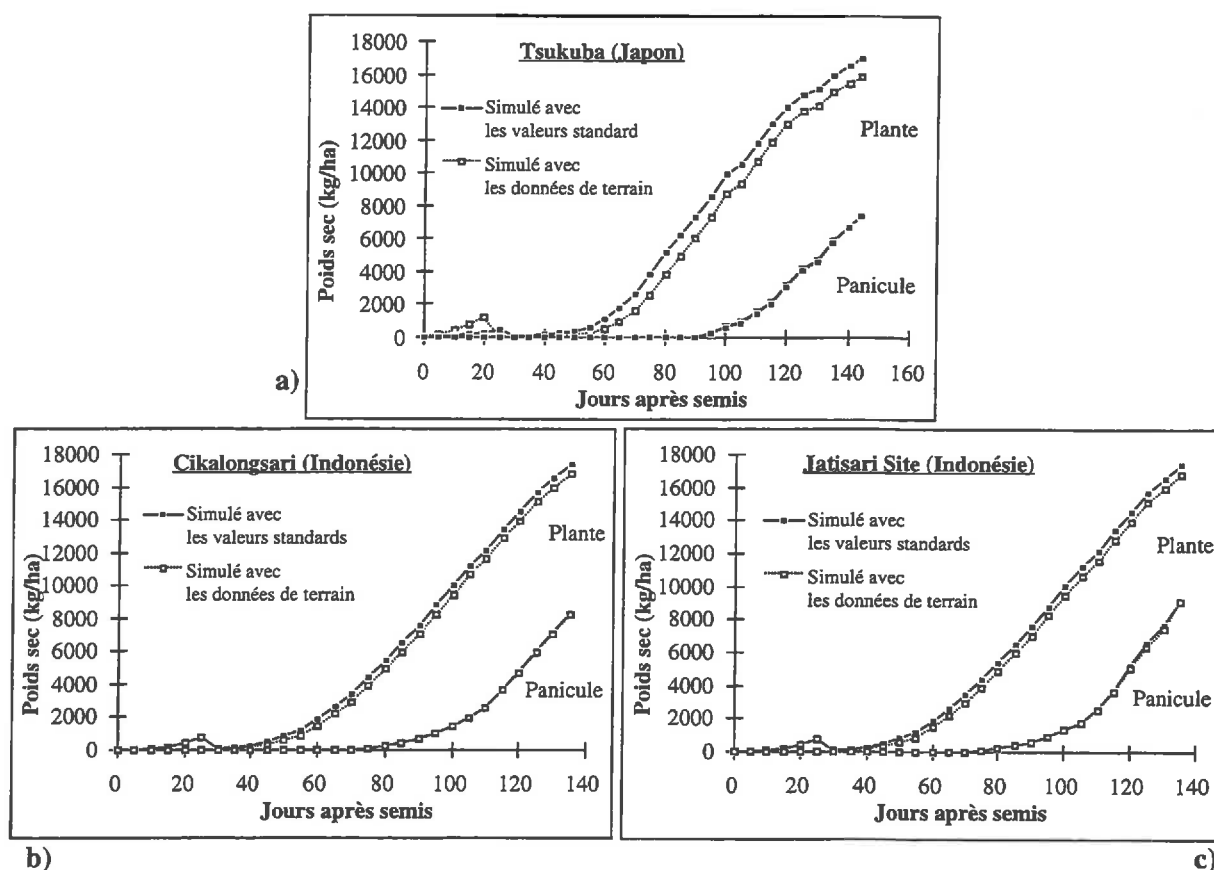


Figure 79 : Comparaison entre les simulations obtenues en utilisant l'ensemble des données de terrain et celles obtenues à partir des valeurs standards pour les paramètres culturaux : NTR (nombre de jours entre le semis et le repiquage), NPLH (nombre de plantes par touffes) et NH (nombre de touffes par m²) à (a) Tsukuba, (b) Jatisari et (c) Cikalongsari.

L'ensemble des erreurs commises lors des différentes approximations ou estimations des paramètres d'entrée du modèle, sont toutes au-dessous de 10%, valeur inférieure à la précision du modèle (Mitchell, 1996). En utilisant les méthodes proposées, il sera donc possible, à partir de la date de semis et de la biomasse aérienne totale des plantes extraites des données radar, d'étalonner le modèle, afin de simuler la croissance de la plante, et à terme, le rendement final.

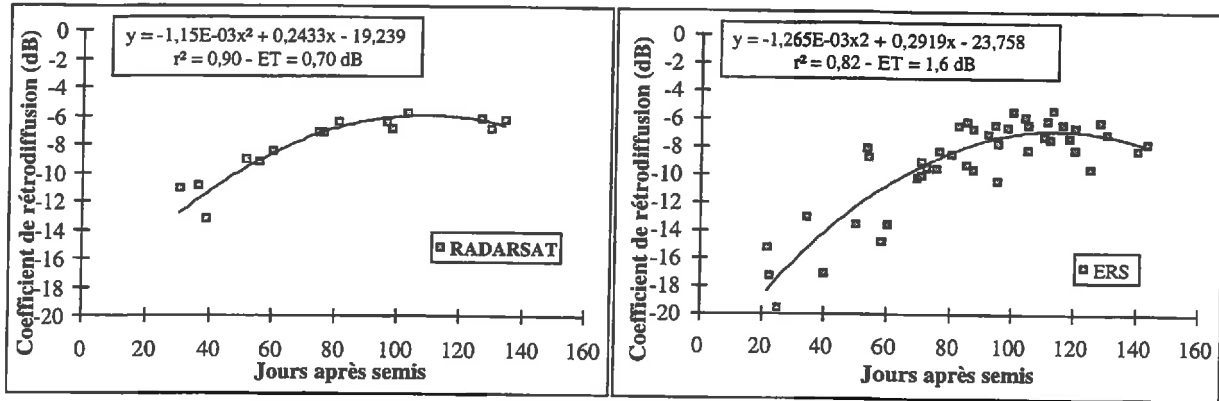
Afin de justifier l'intérêt des données radar, des simulations ont été réalisées en utilisant des tables d'allocation standards (Kropff et al., 1994) ainsi que des dates de semis moyennes pour la région. Les résultats de simulation ont été comparés avec les mesures réalisées sur le terrain. A Jatisari, le nombre de grains par ha simulé avec les dates de semis et les tables d'allocation standards a été comparé à celui mesuré sur les champs de Cikalongsari et Jatisari. Des erreurs entre 15 et 20% ont été observées entraînant des déviations de 8 à 20% sur l'estimation du rendement (entre 0,6 et 1,5 t/ha par rapport au rendement théorique). A Semarang, les rendements simulés avec les dates de semis et les tables d'allocation standards pour les sites d'Ambarawa et de Kuwu ont été comparés à ceux mesurés sur le terrain. Des erreurs de 21% (1t/ha) ont été observées pour le site d'Ambarawa et de 32% (2,5 t/ha) pour le site de Kuwu. Les tables d'allocation et les dates de semis standards ne permettent donc pas une estimation satisfaisante du rendement. Un système permettant de déterminer la date de semis et de calculer les tables d'allocation avec plus de précision est donc nécessaire.

III -4 Estimation des paramètres d'entrée à partir des données radar

La date de semis et les valeurs de biomasse aérienne totale aux dates d'acquisition des données radar, peuvent être déterminées de la manière suivante :

- Date de semis : des relations polynomiales ont été établies entre l'âge et le σ^0 (Figure 80) avec une corrélation r^2 supérieure à 0,8 pour les données ERS et RADARSAT. Cependant, seules les valeurs de rétrodiffusion inférieures à -9 dB peuvent être utilisées pour l'inversion en nombre de jours après semis. Pour déterminer le début du cycle, la date d'acquisition pour laquelle la rétrodiffusion est la plus basse est sélectionnée. A cette date, l'inversion du σ^0 permet de connaître l'âge de la plante, et donc logiquement la date de semis. Ensuite, seulement les images acquises après cette date de semis sont utilisées pour l'inversion en biomasse.

La dispersion autour de la courbe est de 0,7 dB pour les données RADARSAT et de 1,6 dB pour les données ERS. En considérant uniquement les $\sigma^0 < -9$ dB, la précision sur l'inversion de la rétrodiffusion en nombre de jours après semis est donc de ± 5 jours pour les données RADARSAT et de ± 9 jours pour les données ERS. Il faut noter que la régression utilisée pour l'inversion est celle obtenue avec l'ensemble des données. Le nombre de jours après semis sera donc probablement estimé avec un biais positif. L'utilisation d'une régression n'incluant que les données pour lesquelles $\sigma^0 < -9$ dB devrait permettre une meilleure estimation.



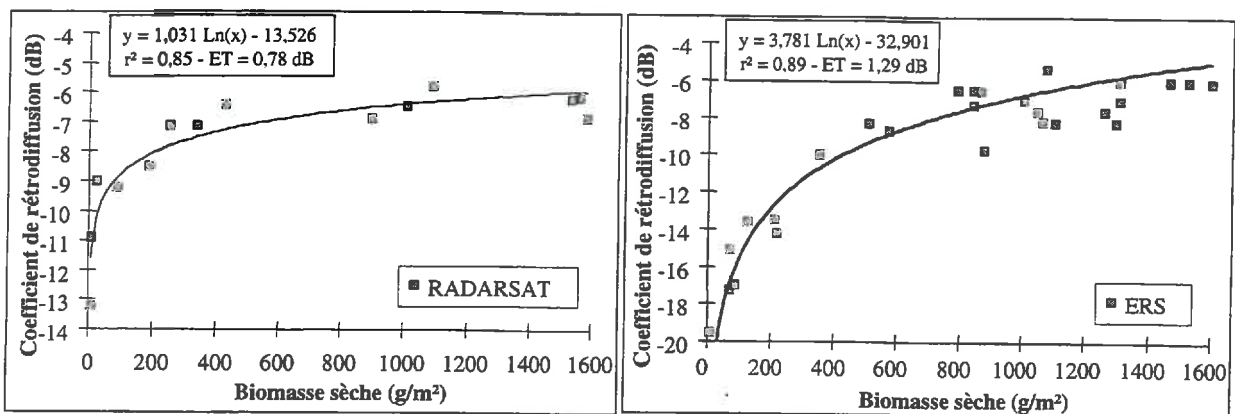
a)

b)

Figure 80 : Relation entre le σ° et l'âge de la plante pour (a) RADARSAT, (b) ERS

- La biomasse des plantes : des relations logarithmiques ont été ajustées entre la biomasse sèche des plantes et le σ° (Figure 81a,b) avec une corrélation r^2 supérieure à 0,8 pour les deux jeux de données. Cependant, il est important de noter que le signal sature à 80 jours ($\sigma^\circ = -7$ dB) pour les données RADARSAT et 100 jours pour les données ERS ($\sigma^\circ = -7$ dB). Ainsi, seulement des rétrodiffusions inférieures à ces valeurs sont considérées pour l'inversion en poids sec.

La dispersion autour de la courbe est de 0,78 dB pour les données RADARSAT et de 1,29 dB pour les données ERS. En considérant la partie inversible de la courbe, l'erreur relative sur l'inversion de la rétrodiffusion en niveau de biomasse sèche est de $\pm 15\%$ pour les données RADARSAT et de $\pm 12\%$ pour les données ERS.



a)

b)

Figure 81 : Relation entre le σ° et la biomasse sèche pour (a) RADARSAT, (b) ERS

Il faut aussi tenir compte du fait que le jeu de données de ERS inclue des mesures acquises pour des conditions de culture très différentes (sites tropical de Semarang, et site tempéré d'Akita), alors que le jeu de données de RADARSAT ne fait intervenir que des données acquises sur le site de Jatisari. Il est donc normal que les dispersions soient plus fortes dans le

cas de ERS. Les relations qui existent entre les données ERS et les paramètres des plantes sont donc plus robustes que celles obtenues pour les données RADARSAT et sont valables pour des sites à la fois tropicaux et tempérés.

Le Tableau 14 et le Tableau 15 résument les paramètres d'entrée dérivés des données radar et utilisés pour les simulations aux sites de Jatisari et de Semarang.

Champ test	Date d'acquisition	σ° (dB)	Date de semis estimée	Biomasse sèche estimée (g/m ²)
Jatisari	18/11/96	-11,08	07/10/96	10,72
	12/12/96	-9,00		80,63
	05/01/97	-7,04		540,21
Cikalongsari	18/11/96	-10,92	06/10/96	12,53
	12/12/96	-9,21		65,77
	05/01/97	-7,10		509,17

Tableau 14 : Informations (date de semis et biomasse sèche) dérivées des données RADARSAT au site de Jatisari.

Champs test	Date d'acquisition	σ° (dB)	Date de semis estimée	Biomasse sèche estimée (g/m ²)
Kuwu	12/01/94	-15,85	12/12/93	90,89
	23/01/94	-10,99		328,66
	10/02/94	-7,01		941,67
Dempet	23/01/94	-11,58	29/11/93	281,18
	16/02/94	-7,03		936,71
Gajah	01/01/94	-17,32	29/11/93	61,61
	23/01/94	-10,38		386,20
	16/02/94	-7,29		874,46
Ambarawa	10/02/94	-11,26	15/12/93	306,01
	16/02/94	-8,28		673,02
	06/03/94	-7,50		827,21

Tableau 15 : Informations (date de semis et biomasse sèche) dérivées des données ERS au site de Semarang.

III -5 Simulations de la croissance des plantes et du rendement des champs de riz, à partir des données radar.

Les simulations ont été conduites avec les données RADARSAT sur le site de Jatisari et avec les données ERS sur le site de Semarang. Après étalonnage des images, le coefficient de rétrodiffusion des champs test a été extrait.

La date de semis et les valeurs de biomasse aérienne totale aux dates d'acquisition radar, ont été déterminées en utilisant la relation entre le σ^0 et le nombre de jours après semis, et entre le σ^0 et le poids sec des plantes.

– RADARSAT (site de Jatisari) :

Les résultats de la simulation ont été validés pour le site de Jatisari pour lequel un jeu de données de terrain détaillé est disponible. La Figure 82a,b montre que la biomasse aérienne totale et le poids sec des panicules simulés correspondent bien à ceux mesurés sur les champs de Jatisari et de Cikalongsari. Cela signifie que la date de semis et les valeurs de biomasse sont bien estimées.

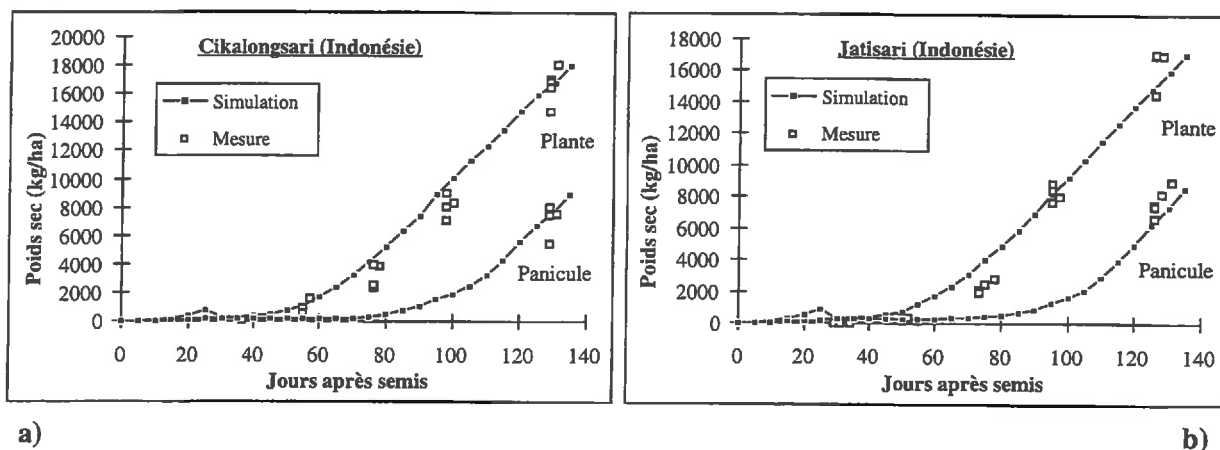


Figure 82 : Comparaison entre la biomasse aérienne totale et le poids sec des panicules mesurés et simulés en utilisant les dates de semis et les valeurs de biomasse déduites des données RADARSAT

A partir des mesures de terrain, il a été possible de simuler la croissance de la culture et ainsi d'estimer un rendement final théorique pour les sites de Jatisari et de Cikalongsari. Ce rendement final théorique a été comparé avec celui obtenu par simulation en utilisant les paramètres d'entrées dérivés des données RADARSAT (Figure 83a,b). Des déviations variant entre 4 et 11% ont été observées par rapport au rendement théorique. A Cikalongsari, l'erreur est de 3,52% (0,24 t/ha) et à Jatisari l'erreur est de 10,68% (-0,84 t/ha).

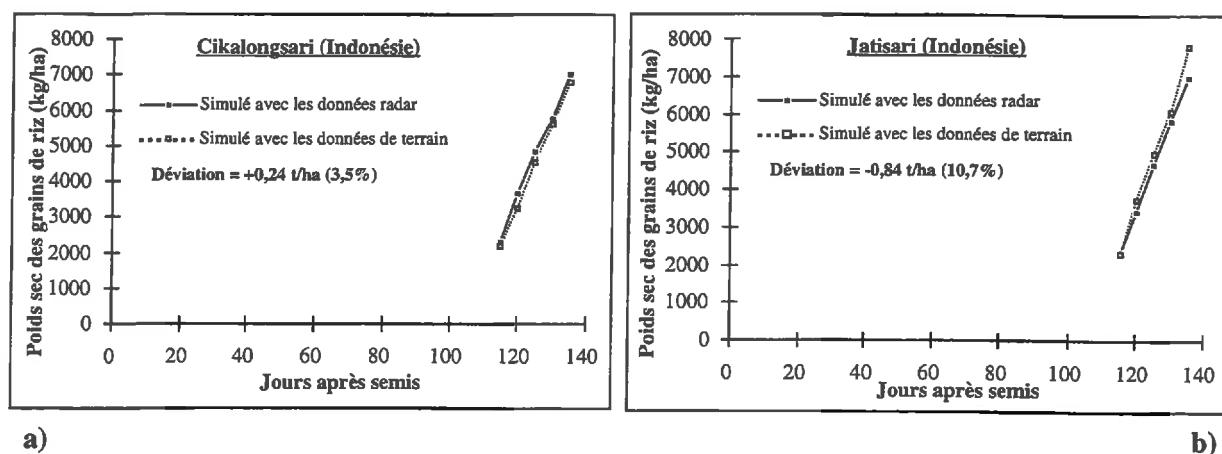


Figure 83 : Comparaison entre le rendement final simulé en utilisant les dates de semis et les valeurs de biomasse déduites des données RADARSAT et celles mesurées sur les champs de Cikalongsari et Jatisari.

De façon à tester la méthodologie sur des champs qui n'ont pas servi à déterminer la relation entre le σ^0 et le nombre de jours après semis ou la biomasse des plantes, des champs appartenant aux trois premiers Golongans du site d'étude de Jatisari, et pour lesquels aucune donnée de terrain n'a été collectée, ont été sélectionnés sur l'image RADARSAT. Le quatrième Golongan n'a pas été sélectionné car, sans l'image de Février 1997, l'estimation des rendements pour ce Golongan paraît difficile. En effet, en raison du problème d'acquisition de l'image de Février, seules deux dates peuvent être utilisées pour estimer les valeurs de biomasse, car lors de la dernière acquisition (Mars 97), les champs de ce Golongan se situent en fin de cycle avec des σ^0 supérieurs à -7 dB, qui ne peuvent pas être inversés (Figure 44). Et, aux dates où l'inversion est possible les champs de ce Golongan sont à des stades très jeunes (moins de 60 jours). Par contre, pour les autres groupes d'irrigation, la date de semis et le niveau de biomasse des champs sélectionnés ont été estimés à partir des données radar et utilisés pour calculer les différents paramètres d'entrée du modèle.

Durant la saison de Novembre 1996 à Mars 1997, aucun accident climatique n'a été enregistré, ce qui explique les forts rendements (théoriques) obtenus sur le site de Jatisari (Figure 83). Les caractéristiques variétales et culturales de l'ensemble des rizières de la plaine de Jatiluhur sont similaires. Elles diffèrent essentiellement par leur calendrier d'irrigation. On peut donc faire l'hypothèse que sur cette plaine, les champs des différents Golongan présenteront à peu près le même rendement. Les mesures faites sur les sites de Jatisari et Cikalongsari peuvent donc être utilisées pour estimer la précision avec laquelle les rendements sont estimés.

Le nombre de grains par hectare simulé pour les 3 Golongans a été comparé au nombre moyen mesuré sur l'ensemble des champs du site de Jatisari (Tableau 4). L'erreur sur l'estimation du nombre de grains représente 9,3% pour le premier Golongan, 8,3% pour le second, et 6% pour le troisième. La Figure 84 présente les résultats de simulation du poids sec des grains de riz et donc du rendement, pour les champs des trois Golongans. Ces simulations ont été comparées avec les rendements théoriques, estimés à partir des mesures de terrain réalisées sur les sites de Cikalongsari et de Jatisari (Figure 83). Les rendements finaux estimés sont de 7,2 t/ha pour le Golongan I, de 7 t/ha pour le Golongan II, et de 7,5 t/ha pour le Golongan III. Comme prévu, le rendement est assez stable sur l'ensemble des Golongans. Ces valeurs correspondent à des erreurs de moins de 5% comparées au rendement moyen théorique estimé sur le site d'étude de Jatisari (7,3 t/ha).

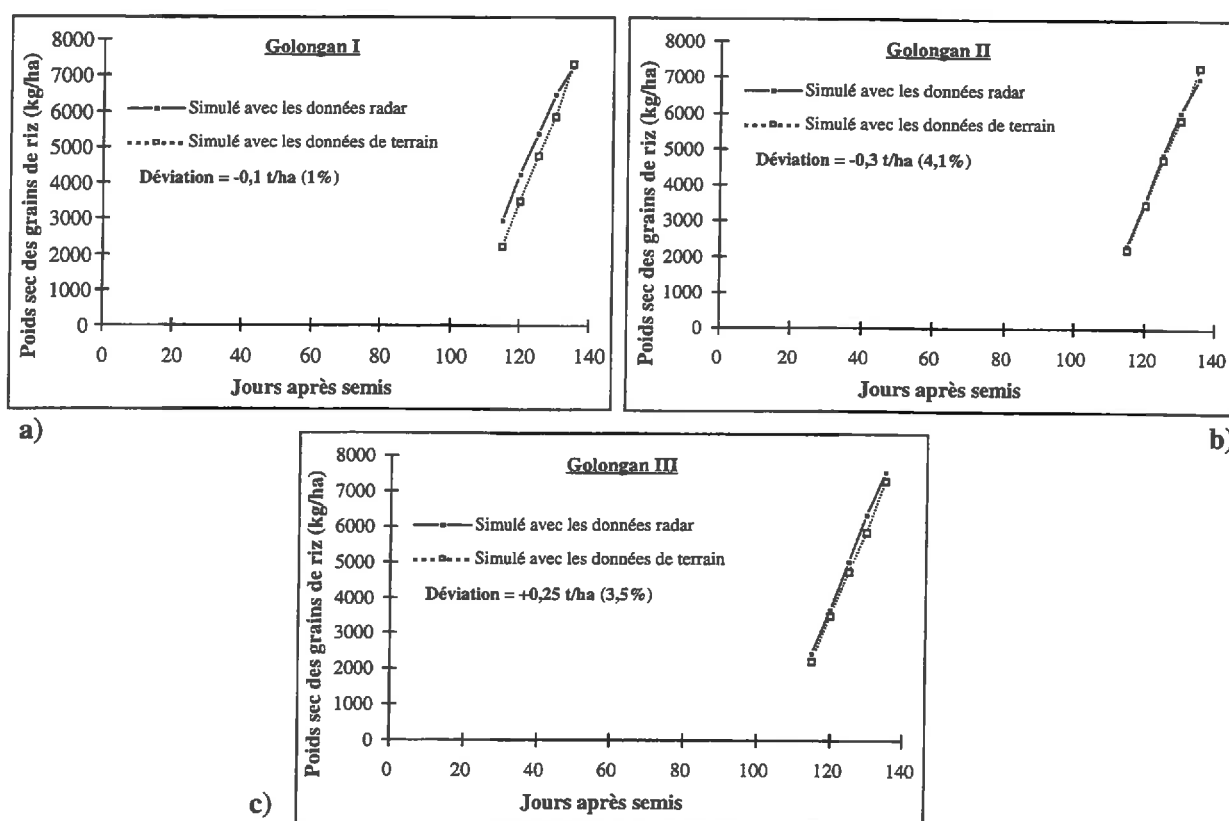


Figure 84 : Comparaison entre le rendement théorique moyen de la région de Jatisari, et les rendements simulés en utilisant la date de semis et les valeurs de biomasse déduites des données RADARSAT pour des champs appartenant aux a) Golongan I, b) Golongan II, c) Golongan III.

- ERS (site de Semarang) :

Au site de Semarang, les valeurs de biomasse aérienne totale au cours du cycle de croissance ont été mesurées pour seulement deux champs : Dempet et Gajah. A partir de ces données de terrain il a été possible de simuler la croissance de la culture et d'estimer un rendement théorique. Parallèlement, la date de semis et les valeurs de biomasse pour différents stades de développement ont été estimées à l'aide des données ERS (Tableau 15). Le rendement final simulé en utilisant les paramètres dérivés des données radar est très proche de ce rendement théorique pour les deux sites (Figure 85a,b). Des déviations de 3,2% (0,2 t/ha) et de 4,6% (0,29 t/ha) ont été trouvées respectivement pour les champs Dempet et Gajah.

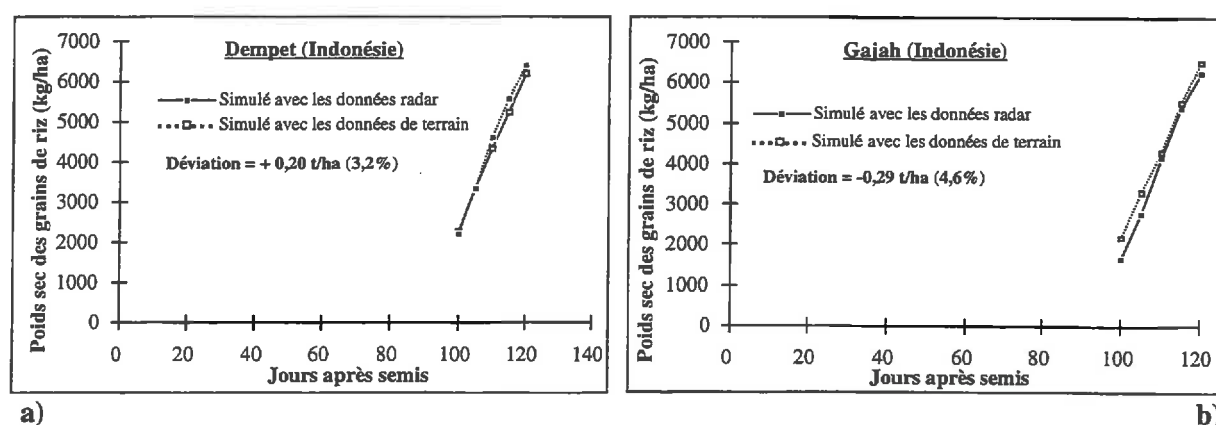


Figure 85 : Comparaison entre le rendement final simulé en utilisant les paramètres d'entrée issus des mesures de terrains (pratiques culturales, date de semis, biomasse aérienne) et ceux issus des données ERS pour les champs (a) Dempet and (b) Gajah.

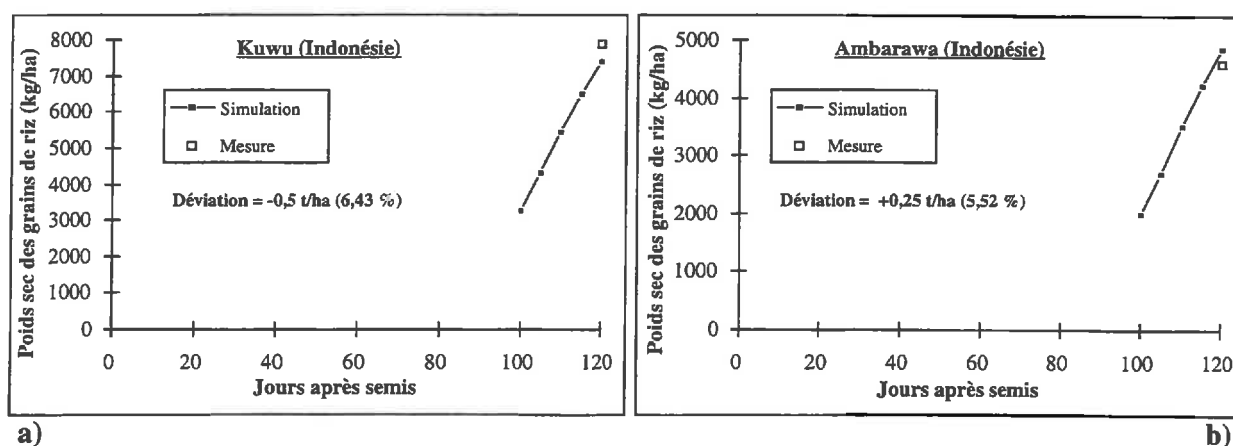


Figure 86 : Comparaison entre les rendements mesurés et les rendements simulés en utilisant les paramètres d'entrée (pratiques culturales, date de semis, biomasse) issus des données ERS pour les champs (a) Kuwu et (b) Ambarawa.

Les champs Kuwu et Ambarawa, aux caractéristiques de production très différentes, n'ont fait l'objet d'aucune mesure de terrain. Par contre, après la récolte, le rendement final obtenu sur ces champs nous a été communiqué. Kuwu, situé sur une plaine fertile, a une production très élevée, de 7,9 t/ha. Ambarawa, au contraire, situé dans une zone montagneuse, est moins fertile avec un rendement de 4,6 t/ha. Les σ^0 de ces champs ont été extraits sur les différentes images ERS et ont permis d'estimer leur date de semis ainsi que les différentes valeurs de biomasse aérienne totale au moment des dates d'acquisition radar (Tableau 15). Ainsi, les différents paramètres d'entrée du modèle ORYZA ont été estimés et la croissance des plantes ainsi que le rendement final ont pu être simulés. La Figure 86a,b présente le résultat de ces simulations en terme d'estimation du rendement. Les résultats montrent une bonne concordance entre mesures et simulations. A Kuwu, le rendement a été estimé avec moins de 6,5% d'erreur (0,5 t/ha) et à Ambarawa il a été estimé avec moins de 5,6% d'erreur (0,25 t/ha).

Les résultats apparaissent donc très prometteurs à la fois pour les données ERS et les données RADARSAT. Il faut noter que les résultats obtenus avec les données ERS présentent une meilleure précision (0,5 t/ha - 7%) que ceux obtenus avec les données RADARSAT (0,9 t/ha - 11%), malgré des conditions moins favorables (jeu de données issu de sites tropicaux et tempérés, prise en compte de champs ayant des caractéristiques de production différentes, validation avec des rendements mesurés sur le terrain après récolte).

Les rendements peuvent donc être estimés à partir des données ERS, ou dans une moindre mesure des données RADARSAT. Cependant, des incertitudes associées à l'extraction des coefficients de rétrodiffusion doivent être considérées pour déterminer la précision avec laquelle les rendements peuvent être estimés. Les capteurs actuels ont une précision radiométrique de l'ordre de $\pm 0,4$ dB (Laur et al., 1996). Cependant, la précision de la rétrodiffusion est également liée au nombre de pixels utilisés pour l'extraction de la rétrodiffusion. Si l'on considère la zone hétérogène de Semarang, l'incertitude sur l'estimation du σ^0 peut être estimée à ± 1 dB (Le Toan et al., 1997). Il est difficile de déterminer statistiquement son impact sur l'estimation du rendement final car il affecte plusieurs paramètres utilisés dans différentes parties du modèle, telles que la date de semis, la durée des différentes phases phénologiques (en combinaison avec les données climatiques) ou l'estimation de la biomasse. C'est pourquoi nous avons réalisé des simulations en utilisant des rétrodiffusions variant de -1 à + 1 dB. Le Tableau 16 décrit les résultats obtenus pour les configurations extrêmes (σ^0_{\min} et σ^0_{\max}). Des erreurs totales inférieures à 9% (0,7 t/ha) ont été

obtenues pour ERS et des erreurs de 15% (1,5 t/ha) pour RADARSAT. Ces valeurs doivent être comparées aux précisions avec lesquelles les rendements sont mesurés sur les champs. En effet, il n'est pas raisonnable de penser qu'un modèle puisse estimer le rendement final avec de meilleures précisions que les mesures réalisées sur le terrain.

Site	Rendement Mesuré (t/ha)	Rendement simulé (t/ha)	Rendement estimé avec σ^0		Rendement estimé avec σ^0_{\min}		Rendement estimé avec σ^0_{\max}	
			t/ha	erreur t/ha (%)	t/ha	erreur t/ha (%)	t/ha	erreur t/ha (%)
Cikalongsari		6,78	7,02	0,24 (3,52)	7,40	0,62 (9,07)	6,76	-0,03 (0,38)
Jatisari		7,83	6,99	-0,84 (10,7)	6,87	-0,96 (12,25)	6,77	-1,06 (13,57)
Kuwu	7,90		7,40	-0,50 (6,34)	7,40	-0,66 (-8,29)	7,91	0,01 (0,08)
Dempet		6,20	6,40	0,20 (3,19)	6,37	0,17 (2,69)	6,37	0,17 (2,66)
Gajah		6,23	6,52	0,29 (4,63)	6,75	0,52 (6,47)	6,47	0,23 (3,75)
Ambarawa	4,60		4,85	0,25 (5,52)	4,48	-0,12 (4,48)	4,48	-0,12 (2,51)

Tableau 16 : Impact de l'incertitude sur l'extraction du coefficient de rétrodiffusion σ^0 sur l'estimation des rendements. Comparaison entre les rendements mesurés ou simulés avec les données de terrain et les rendements déduits des σ^0 , σ^0_{\min} et σ^0_{\max} .

III-6 Discussion

La méthodologie de prévision des rendements repose sur l'inversion de la rétrodiffusion des rizières en âge des plantes et en valeurs de biomasse aérienne. Les relations utilisées sont considérées comme théoriques et ont pour but d'être applicables à d'autres sites. Les relations obtenues avec les données ERS incluent à la fois des données issues de sites tempérés et de sites tropicaux. Ainsi, elles sont valides pour différentes conditions climatiques et culturelles. Par contre, les relations entre les données RADARSAT et les paramètres des plantes n'ont été établies qu'à l'aide de données issues de la plaine de Jatiluhur durant le même cycle de croissance. Ces résultats ont été validés par un modèle théorique de rétrodiffusion des rizières (Partie II) mais ce n'est pas suffisant pour en déduire que ces relations sont robustes et valides lorsque d'autres sites seront considérés. Il en va de même pour les simulations de croissance des plantes à l'aide du modèle ORYZA, et donc de l'estimation du rendement. Il faut considérer que les estimations issues des données RADARSAT ont été obtenues dans des conditions optimales, contrairement à celles des données ERS.

Le nombre de dates nécessaire pour réaliser des simulations cohérentes dépend du nombre de jours qui séparent les acquisitions, ainsi que du stade de développement du champ lors de la dernière acquisition. La méthode d'estimation des rendements nécessite au moins 2 à 3 dates, tout comme celle de la cartographie des rizières ou de suivi de croissance (avec ERS). En considérant la répétitivité temporelle de 35 jours de ERS, 3 images peuvent être acquises pour une variété ayant un cycle de croissance de 120 jours. La répétitivité temporelle de RADARSAT étant de 24 jours, 5 scènes peuvent être acquises durant la même période. Il est également possible d'utiliser à la fois les images des modes orbitaux descendants et ascendants, afin de doubler la possibilité d'acquisition d'images.

D'autre part, dans un objectif de prévision des rendements, il est intéressant de connaître combien de jours avant la récolte, le rendement peut être estimé avec précision. Pour cela, plusieurs simulations ont été réalisées. Il en résulte qu'une précision de 90% dans l'estimation du rendement est possible si la dernière information de biomasse est acquise avant saturation, pour un stade de développement d'au moins $DVS=0,7$. Ce stade de développement correspond au début de la phase de formation paniculaire. A ce stade, les talles qui porteront les panicules sont entièrement formés et la formation paniculaire est initiée. Il est atteint environ 55 jours avant la récolte pour une variété d'environ 120 jours, cultivée en environnement tropical.

Dans le cas des rizières pluviales, tout comme pour le suivi de la croissance de la plante, il paraît très difficile de déterminer des relations entre la rétrodiffusion radar des rizières et les valeurs de biomasse ou le nombre de jours après semis. L'estimation des rendements des rizières pluviales paraît particulièrement difficile.

Enfin, il a été démontré qu'il était possible de déterminer et de suivre avec précision la quantité de biomasse aérienne totale produite au cours du cycle de croissance par les rizières irriguées, ainsi que les stades de développement. Ceci peut être d'un grand intérêt en matière d'estimation de l'émission de méthane atmosphérique par les champs de riz. En effet, l'émission de CH_4 des rizières est fortement corrélée à la biomasse aérienne (Sass et al., 1990) mais dépend aussi du stade de développement de la plante (Huang et al., 1997ab).

IV - ESTIMATION DE L'EMISSION DE METHANE

Le méthane (CH₄) est, par son importance, le deuxième gaz à effet de serre après le CO₂, et les rizières inondées sont une source importante d'émission de méthane dans l'atmosphère (Figure 87). Or, la quantité de CH₄ émise par les rizières est très mal estimée. Un système permettant d'améliorer ces estimations est donc nécessaire. Pour cela, il faut d'abord comprendre les mécanismes responsables de l'émission du méthane par les rizières ainsi que les facteurs influençant cette émission, afin d'appréhender le problème dans son ensemble. Ce chapitre est une réflexion prospective sur l'utilisation des données de télédétection pour l'aide à l'estimation de l'émission de méthane par les rizières.

IV -1 Contexte

Le riz est une des rares céréales à pouvoir être cultivée dans des conditions inondées. En effet, le riz possède un système efficace de circulation de l'air, de la partie aérienne de la plante aux racines (Swaminathan, 1984). L'air pénètre dans la plante par les stomates des feuilles et circule jusqu'aux noeuds à la base de la plante. Lors de la circulation de l'air de la partie aérienne vers les racines, l'oxygène est distribué dans les tissus où il est utilisé pour la respiration. A partir des racines, l'air est diffusé dans le sol. Seule une partie de la plante doit être exposée à l'air pour que le système fonctionne efficacement. Grâce à ce système de circulation de l'air, les racines respirent en milieu anaérobie et utilisent les hydrates de carbone efficacement pour produire l'énergie nécessaire au développement de la plante, même lorsqu'elle pousse dans des environnements inondés. Ainsi, les champs de riz peuvent rester inondés durant la majeure partie de leur cycle de croissance, et cette couche d'eau présente sur le sol, est à l'origine d'une production importante de méthane. En effet, les rizières inondées sont responsables d'environ 20% du méthane anthropique global (Denier van der Gon, 1996).

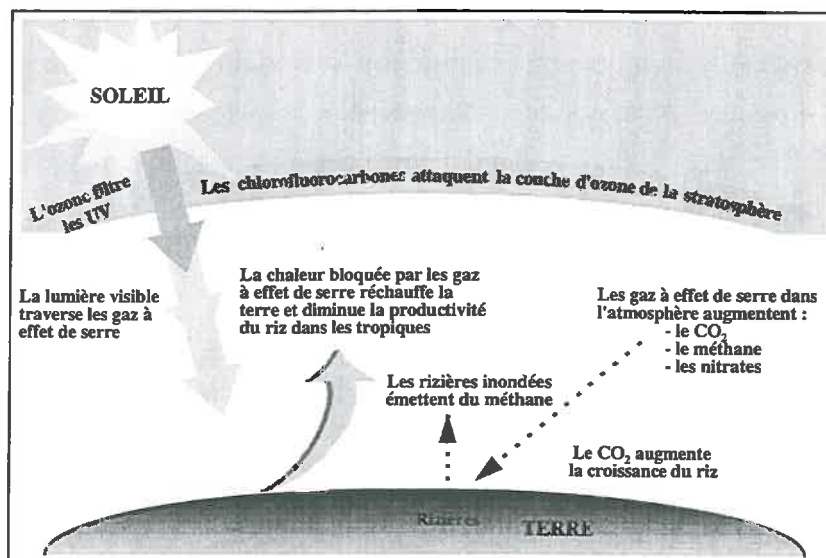


Figure 87 : Effets des changements climatiques globaux sur les rizières (source : IRRI, 1993)

Or, les concentrations de méthane atmosphérique ont plus que doublé durant les 200 dernières années avec une progression d'environ 0,5 à 1% par an (Steele et al., 1992). Et selon Bouwman (1991) ou Anastasi et al. (1992), l'émission du méthane par les rizières inondées devrait encore augmenter car il est prévu que la production de riz irrigué passe de 473×10^6 T en 1990 à 781×10^6 T en 2020, pour répondre aux besoins alimentaires des populations en constante augmentation. De plus, l'augmentation de la température stimule l'émission de méthane, donc, dans un contexte de réchauffement global de la planète, elle devrait être amenée à progresser nettement. L'IRRI (1993) considère d'ailleurs que si les techniques culturales ne changent pas, l'émission de CH_4 par les rizières devrait augmenter de 50 à 100% dans les 30 prochaines années.

Il est donc essentiel de déterminer la contribution des cultures de riz à l'émission globale de CH_4 et de développer des techniques permettant de contrôler et diminuer les émissions de CH_4 par les champs de riz.

De nombreuses études ont tenté d'évaluer les taux d'émission de méthane par les rizières à l'échelle globale. La première estimation d'émission de méthane par les rizières a été estimée à 190 Tg/an. Elle était basée sur l'incubation anaérobie d'échantillons de sol de riz (Koyama, 1963). Les premières mesures en champs ont été réalisées en Californie par Cicerone et Shetter (1981), suivies par des études intensives menées en Espagne (Seiler et al., 1984) et en Italie (Holzapfel-Pschorn et Seiler, 1986). Les résultats de ces mesures ont réduit les estimations globales à environ 100 Tg/an et ont montré l'importance de la plante de riz comme transporteur du méthane, du sol vers l'atmosphère. Actuellement l'émission de méthane par les rizières est estimée, par le IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) à 60 ± 40 Tg/an (Denier van der Gon, 1996), ce qui représente entre 6 et 30% du méthane anthropique global. Ces estimations restent cependant fortement expérimentales et imprécises d'autant plus que l'estimation de la contribution de l'agriculture rizicole au méthane atmosphérique est largement basée sur des extrapolations faites à partir de mesures de flux de CH_4 réalisées sur quelques champs en Chine, Italie, Espagne et Etats Unis, alors que plus de 90% du riz mondial est produit en Asie (Minami et Neue, 1994). Ces incertitudes résultent également d'une méconnaissance dans l'estimation des surfaces rizicoles et sur la durée d'inondation des champs.

Une estimation plus précise d'émission de CH_4 global par les rizières est donc nécessaire. Pour l'échelle globale de ce phénomène les données de télédétection présentent un intérêt majeur afin d'estimer l'émission de méthane de façon plus étendue que des mesures réalisées sur des champs ou en laboratoire, et extrapolées à l'échelle du globe.

Les résultats expérimentaux et théoriques précédents ont montré qu'il était possible, à partir des données radar des satellites ERS et RADARSAT :

- de déterminer les surfaces rizicoles inondées, grâce à la très forte variation temporelle de la rétrodiffusion des champs de riz, comparée aux autres types d'occupation du sol.
- de déterminer le nombre de cultures par an en suivant le cycle de croissance des plantes.
- de suivre la production de biomasse tout au long du cycle de croissance de la culture, à un pas de temps journalier, en couplant des informations (date de semis, biomasse aérienne totale) dérivées des données radar, avec le modèle de production de riz ORYZA.

Or, des études menées sur l'émission de méthane (Schütz et al., 1989) ont montré que la production de CH_4 dans les sols des rizières inondées dépendait du développement et de la croissance du riz. De même, il a été démontré que les flux journaliers de méthane des sols rizicoles inondés étaient fortement corrélés avec la biomasse du riz (Sass et al., 1990) et que le méthane saisonnier émis sur une période de 5 ans pouvait être décrit quantitativement comme une fonction du sol, de la variété des plantes et de la productivité du riz (Huang et al., 1997a).

Ainsi, en estimant la quantité de biomasse produite au cours du cycle de croissance et en assurant un suivi du stade de développement de la plante, les données de télédétection présentent un réel potentiel pour aider à l'estimation de l'émission de méthane à une échelle régionale ou globale.

Certains modèles empiriques calculent la quantité de méthane émis par les rizières à l'échelle globale de la manière suivante Badjes et Bridges (1992) :

(26)

avec A_i = Surface récoltée en riz = surface cultivée x nombre de cultures

R_i = Emission moyenne de méthane par les surfaces individuelles
durant les périodes d'émission (échelle du champ)

t_i = Longueur moyenne des périodes de végétation respectives.

En utilisant les données radar nous avons pu déterminer les surfaces rizicoles ainsi que le nombre de cultures par an (A_i) et suivre la croissance de la plante, et donc ses stades de développement (t_i). Le paramètre qu'il reste à estimer est donc R_i qui correspond à la quantité moyenne de méthane émis par un champ de riz durant son cycle de croissance.

Pour cela deux approches peuvent être envisagées :

- Utiliser des relations issues de travaux expérimentaux permettant de relier directement l'émission de méthane à certains paramètres de la croissance de la plante tels que la production primaire nette (NPP), la biomasse aérienne totale ou la biomasse des racines (Taylor et al., 1991 ; Bachelet et Neue, 1993 ; Bachelet et al., 1995 ; Huang et al., 1997ab). Ces paramètres peuvent être tirés des données de télédétection couplées à un modèle de production.
- Utiliser des modèles mécanistes d'émission du méthane par les rizières qui prennent en compte l'ensemble des mécanismes de formation du méthane par la plante de riz, ainsi que les différents facteurs qui affectent cette émission. Dans ce cas, les données de télédétection sont utilisées pour estimer certains paramètres d'entrée importants pour le fonctionnement du modèle.

Ces approches devront prendre en compte les variations spatiales et temporelles de l'émission de méthane qui résultent de l'effet de différents facteurs tels que le climat, les propriétés du sol, ou les pratiques culturales, mais également des caractéristiques de la plante.

IV -2 Les mécanismes d'émission du méthane par les rizières inondées

L'inondation des rizières durant la majeure partie de leur cycle de croissance est responsable de la production du méthane dans le sol. En effet, la mise en eau des champs, généralement au moment du semis ou du repiquage, coupe l'approvisionnement en oxygène du sol, qui entraîne une fermentation anaérobie de la matière organique. Le méthane est produit par méthanogénèse dans le sol anoxique. Certaines bactéries du sol, dites méthanogènes, décomposent la matière organique provenant des pailles restant de la culture précédente, d'algues mortes ou de restes d'amendements organiques, ce qui provoque la production de méthane. La majorité du méthane émis (plus de 80%) est transporté dans l'atmosphère à travers la plante par les racines (Cicerone et al., 1983). Ce phénomène évolue avec la croissance de la plante par phénomène de transpiration. Il fait intervenir des flux inverses à ceux décrits précédemment pour la circulation de l'air dans la plante. Le méthane produit dans le sol, peut cependant être également transporté dans l'atmosphère, directement en tant que bulles de gaz à travers l'eau ou par des mécanismes de diffusion à la surface de la couche d'eau (Figure 88). Les phénomènes de diffusion du méthane à travers la couche d'eau représentent cependant moins de 1% du méthane émis vers l'atmosphère (Schütz et al., 1989). Les phénomènes d'ébullition dépendent des caractéristiques texturales et chimiques des sols et des pratiques culturales (Minami et Neue, 1994).

La quantité totale de méthane émis par les rizières résulte de l'effet net de la production et de l'oxydation du méthane. Une partie considérable du méthane produit dans le sol peut être oxydée par des bactéries dites méthanotrophes avant d'atteindre l'atmosphère. Les méthanotrophes utilisent l'oxygène libre pour oxyder le CH_4 et sont actives dans les interfaces oxiques-anoxiques telles que les interfaces sol-eau et racine-sol (rhizosphère). L'oxydation du méthane dans la rhizosphère du riz dépend du stade de développement de la plante et devient de moins en moins importante lorsque la plante atteint le stade de maturation (Denier van der Gon, 1996).

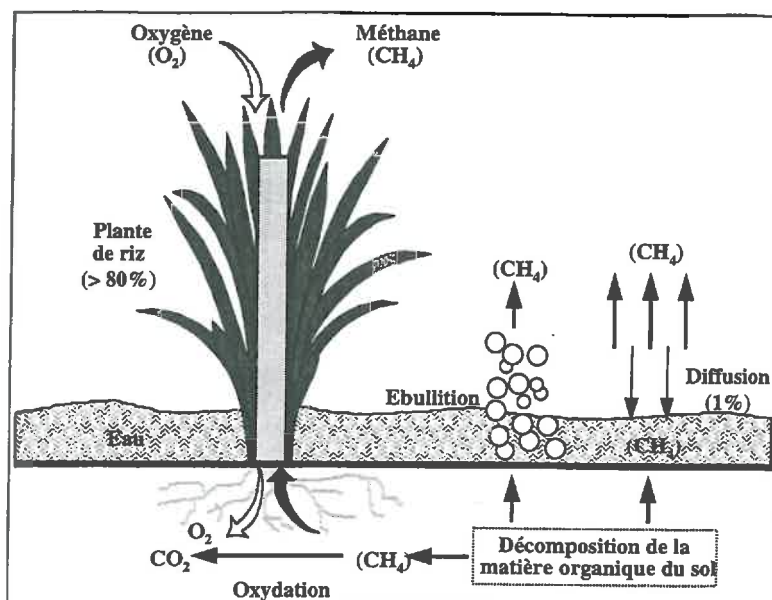


Figure 88 : Emission de méthane par les plantes de riz
(source : IRRI, 1993)

La morphologie de la plante intervient donc directement sur la quantité de méthane émise par les rizières puisqu'elle agit au niveau de la production de méthane en libérant des substances organiques dans la rhizosphère, et en transportant le méthane produit dans la rhizosphère jusque dans l'atmosphère. La plante est également responsable de la diffusion de l'oxygène atmosphérique dans la rhizosphère à travers le système racinaire des plantes, et donc, de l'oxydation du méthane.

IV -3 Les facteurs influençant l'émission de méthane

Un certain nombre de facteurs influencent la capacité des champs de riz à émettre du méthane : le climat, les propriétés des sols et les pratiques culturales. Ces facteurs sont à l'origine de variations de l'émission de méthane dans le temps, au cours d'une journée, mais aussi dans l'espace.

IV-3-1 Le climat

- La température de l'air : les températures élevées favorisent le passage du CH_4 dans la plante ainsi que son émission, par phénomène de transpiration des feuilles. Ainsi, Denier van der Gon (1996) a observé une corrélation positive entre l'émission de méthane par les rizières et la température de l'air et Banik et al. (1994) ont trouvé que l'émission de CH_4 augmentait avec des températures supérieures à 20°C .
- L'intensité lumineuse : des résultats récents ont montré que l'émission de méthane par les rizières augmentait de façon linéaire avec l'intensité lumineuse (Banik et al., 1994 ; Denier van der Gon, 1996). En effet, l'intensité lumineuse contrôle l'ouverture des stomates et donc les processus de transpiration, ce qui influe sur l'émission du CH_4 à travers la plante.

D'autre part, la température et le rayonnement solaire ont des effets stimulants sur la production de biomasse et donc sur la quantité de substrat disponible dans le sol, ce qui favorise d'une part, la production de CH_4 dans le sol mais aussi l'émission de méthane par le transport du gaz à travers la plante.

- Vitesse du vent : l'influence de la vitesse du vent sur l'émission de CH_4 est contestée. Certains travaux considèrent que la vitesse du vent agit sur l'émission de méthane par des phénomènes de diffusion de la couche d'eau, et d'évaporation à la surface des feuilles (Banik et al., 1994). Au contraire, Steele et al., 1987, n'ont observé aucun effet de la vitesse du vent sur l'émission de méthane.

Ces facteurs entraînent une grande variation journalière de l'émission de méthane. En général les taux d'émission sont plus forts en début d'après midi et plus faibles la nuit jusqu'à tôt le matin. En effet, une diminution de la température du sol entraîne une diminution de la production de CH_4 et une augmentation du taux de CH_4 détruit par oxydation. Certains facteurs tels que les propriétés des sols ou les pratiques culturales peuvent cependant modifier ce schéma (Minami et Neue, 1994). Pour les mêmes raisons, l'émission de méthane varie entre la saison humide et la saison sèche. Ainsi, Denier van der Gon (1996) a observé des émissions significativement plus importantes durant la saison sèche que durant la saison humide.

IV -3-2 Les propriétés des sols

Les propriétés des sols influencent fortement l'environnement physique et chimique dans lequel les bactéries méthanogènes et méthanotrophes se développent. Les différences physiques et chimiques des sols sont une des causes majeures de la variation de l'émission de CH_4 d'un site à l'autre (Denier van der Gon, 1996).

- Facteurs chimiques : la teneur en sulfate, la salinité et la teneur en calcaire des sols influencent positivement ou négativement l'émission de méthane ainsi que l'acidité du sol (pH). Or le processus de production de méthane dans le sol étant un processus microbologique, il est sensible aux changements du pH. La méthanogénèse est généralement favorisée par un pH neutre ou légèrement basique selon les sols (Minami et Neue, 1994).

Le potentiel redox du sol joue également un rôle important dans la production de méthane : dès l'inondation des champs, le potentiel redox (Eh) des sols diminue. Le processus de production de méthane est initié dès que le Eh atteint -150 mV (Wang et al., 1993). La production de méthane est ensuite généralement corrélée négativement avec le potentiel redox (Minami et Neue, 1994 ; Banik et al., 1994).

Enfin, la production de méthane est généralement corrélée positivement avec le carbone du sol (Minami et Neue, 1994). En effet, la teneur en carbone du sol contrôle l'activité des bactéries méthanogènes. Plus la présence de sources carbonées dégradables par les méthanogènes est importante, plus les niveaux d'émission du CH_4 sont forts (Neue et al., 1994). Ainsi, si au moment de l'inondation des champs, les pailles de la culture précédente sont toujours présentes, les taux d'émission de CH_4 seront plus importants.

- Facteurs physiques : les facteurs physiques concernent la texture et la teneur en argile des sols. Sass et al. (1994) ont observé une relation inverse entre l'émission de CH_4 et la teneur en argile. La texture du sol affecte l'infiltration de l'eau dans le sol, et donc la production de méthane (Denier van der Gon, 1996). La texture peut être modifiée par les techniques culturales.
- La température du sol : tous les auteurs ne sont pas d'accord en ce qui concerne l'effet de la température du sol sur l'émission de méthane par les rizières. La plupart considère qu'elle affecte fortement l'activité des micro-organismes du sol, dont ceux responsables de la production et de la consommation de méthane. Généralement, la diffusion du méthane augmente avec la température du sol. La température optimale est 30 à 35 °C, et la production de CH_4 est nulle au dessous de 20 °C (Minami et Neue, 1994). D'autres auteurs considèrent au contraire que la variation de la température

du sol ne peut pas expliquer les variations de l'émission de méthane durant la saison (Sass et al., 1990 ; Huang et al., 1997b). Il est en fait, difficile d'évaluer l'effet de la température du sol sur l'émission de méthane par les rizières car souvent, sur un site donné, la température du sol varie peu durant la journée (Banik, 1994 ; Denier van der Gon, 1996).

Finalement, Aiju et Mingxing (1996) résument l'effet des sols de la façon suivante : la teneur en matière organique et les caractéristiques chimiques et physiques du sol sont des facteurs majeurs pour l'émission moyenne de CH_4 durant la saison de croissance, alors que la température du sol contrôle les variations journalières de l'émission de méthane par les rizières.

IV -3-3 Les pratiques culturales

- Variété : plus de 80% du méthane étant libéré dans l'atmosphère à travers la plante de riz, ses caractéristiques morphologiques ont un impact important sur l'émission de méthane (Denier van der Gon, 1996). Il existe donc des différences importantes d'émission de méthane selon les variétés, celles sensibles à la photopériode favorisant l'émission de méthane (Parashar et al., 1991).

Les différences dans les caractéristiques variétales vont influencer l'émission de méthane à plusieurs niveaux :

- La production de biomasse des rizières, variable selon les variétés, stimule la production de CH_4 dans le sol en augmentant la quantité de substrats méthanogéniques dans le sol.
 - Les variétés stimulent plus ou moins le transport du méthane par les racines des plantes du sol vers l'atmosphère, ainsi que l'oxydation du méthane dans la rhizosphère par le transport de l'oxygène dans la direction opposée.
 - La durée de la saison de croissance est différente selon les variétés. Elle a une influence importante sur l'émission annuelle de CH_4 par les écosystèmes rizicoles. Si le cycle de croissance est long, la période d'inondation sera plus longue pour un cycle donné. Par contre, si le cycle de croissance est court et qu'il permet plusieurs récoltes par an, l'émission annuelle de méthane sera d'autant plus importante.
- La fertilisation : les modes de fertilisation influent fortement sur l'émission de méthane. Les méthodes traditionnelles qui combinent des fertilisants organiques et minéraux favorisent de façon importante la production de méthane. Les taux d'émission les moins élevés sont obtenus avec des fertilisants minéraux purs, et les plus élevés avec des fertilisants organiques purs, ces derniers augmentant la quantité de matières organiques du sol (Denier van der Gon, 1996). D'autre part, les fertilisants favorisant la production de biomasse des plantes, ils stimulent également la production de méthane en augmentant la quantité de substrats méthanogène du sol.

- Gestion de l'eau : la gestion de l'eau est un paramètre très important dans la production du riz et a un impact majeur sur l'émission de méthane. L'inondation et le drainage des rizières contrôlent l'oxygène disponible dans le sol, ce qui détermine l'émission de CH_4 en contrôlant la méthanogenèse et l'oxydation du CH_4 .

Certains auteurs considèrent également que la hauteur de la couche d'eau influence l'émission de méthane. Celle-ci augmente jusqu'à des hauteurs d'eau de 10 cm puis diminue (Sebacher et al., 1996). Cependant, Lindau et al. (1991) n'ont pas observé de relations entre la profondeur de l'eau dans les champs de riz entre 5 et 10 cm et l'émission de CH_4 .

Enfin, de grandes quantités de méthane du sol sont émises dans l'atmosphère, lorsque différentes pratiques culturales telles que le labour, la mise à niveau, le repiquage, le semis, ou la récolte sont réalisées sur des champs inondés.

Pour l'instant, l'estimation de l'émission de méthane par les champs de riz varie de 6 kg/ha à 1700 kg/ha par saison, la plupart se situant entre 100 et 500 kg/ha (Minamie et Neue, 1994). Ces valeurs, très variables, ont été obtenues par extrapolation de mesures réalisées en Espagne, Italie ou aux Etats-Unis. Or, l'ensemble de ces informations indique qu'il est indispensable de prendre en compte les rizières tropicales pour l'estimation de l'émission de méthane à l'échelle globale.

En effet les conditions de culture en milieu tropical favorisent largement la production de méthane. D'une part, les conditions climatiques sont optimales avec des températures de l'air et du sol constantes à environ 30°C et de fortes intensités lumineuses durant la journée. D'autre part, les techniques culturales qui comprennent l'inondation du champ de riz (sous une couche d'eau d'environ 10 cm) durant la majeure partie du cycle de croissance de la culture, l'utilisation de variétés photosensibles, le nombre de cultures par an, stimulent également l'émission de méthane.

IV -4 Relation entre la croissance de la plante et l'émission de méthane

Plusieurs auteurs ont démontré que l'émission de méthane par les rizières était fortement corrélée à la production de biomasse aérienne (Sass et al., 1990 ; Whiting et Chanton 1993 ; Huang et al., 1997b) ainsi qu'au stade de développement de la plante (Minami et Neue, 1994 ; Denier van der Gon, 1996 ; Huang et al., 1997b). Une fois que le potentiel redox du sol atteint la valeur critique de -150 mV, la production de méthane suit la production de biomasse. Selon les caractéristiques des sols, cette valeur peut être atteinte entre quelques heures et un

mois après inondation (Denier van der Gon, 1996). En fin de saison, l'émission de méthane n'augmente plus avec la croissance de la plante car la panicule n'intervient pas dans le transport du méthane, qui se fait par les feuilles. Or, après le stade épiaison toute l'assimilation de carbone est distribuée aux panicules. C'est pourquoi Huang et al (1997b), considèrent que l'émission de CH_4 suit la production de la biomasse végétative (feuilles, tiges). De même Minamie et Neue (1994) ont observé que l'émission de CH_4 augmentait durant la phase végétative, puis diminuait après l'initiation florale.

Ces résultats montrent que la plante de riz est un contrôleur très fort de l'émission de CH_4 et que la contribution de la production de biomasse à l'émission de CH_4 n'est pas seulement contrôlée par la taille mais aussi par l'âge de la plante. En effet, la biomasse influe à la fois sur la production de matière organique carbonée et donc de la production de CH_4 dans le sol par les méthanogènes, et sur l'augmentation du transport du CH_4 à travers la plante (Banik et al., 1994).

Ainsi, Aselmann & Crützen (1989) estiment que l'émission de méthane par les rizières correspond à 3 à 7% de la production primaire nette (NPP) de la culture. Des travaux ont d'ailleurs utilisé un taux de 5% pour évaluer l'émission de méthane à une échelle régionale ou globale (Taylor et al., 1991 ; Bachelet et Neue, 1993 ; Bachelet et al., 1995).

Des études récentes estiment cependant que seule la production de biomasse ne peut suffire pour estimer les valeurs d'émission de méthane.

Ainsi, Bachelet et Neue (1993) ont déterminé l'émission de méthane des rizières à partir de la NPP mais en considérant également les caractéristiques des sols selon la base de données de Zobler (1986), qui classe les sols des rizières selon leur potentiel à produire du méthane.

Huang et al. (1997b) considèrent que l'émission de méthane est fortement dépendante de la variété cultivée. L'auteur sépare donc les variétés en 2 catégories selon des indices de variété VI ($\text{VI}=1,5$ variété à forte émission, $\text{VI}=1,0$ variété à faible émission) et relie par une corrélation linéaire le produit entre la biomasse végétative aérienne (AVB) et cet indice, à l'émission journalière de méthane ($r^2=0,923$). L'émission de méthane reste cependant constante pour des valeurs supérieures à $1100 \text{ mg/m}^2/\text{j}$ ($\text{VI} \times \text{AVB} = 1550 \text{ g/m}^2$), le facteur limitant pouvant être la taille de la population méthanogène.

Une autre étude, menée sur l'ensemble des écosystèmes inondés, a montré que l'émission de méthane n'était pas uniquement conduite par la NPP mais par la production d'écosystème nette (NEP). La NEP est égale à la NPP moins la respiration du sol et la respiration microbienne (Whiting et Chanton, 1993). Les auteurs, relient linéairement l'émission de méthane à la NEP, pour l'ensemble des écosystèmes inondés, et estiment l'émission de CH_4 à 3% de la NEP journalière.

Tous ces travaux montrent que la biomasse est un facteur clé pour l'estimation de l'émission de méthane, même si d'autres paramètres doivent être pris en compte. Cependant, pour une variété donnée, et dans des conditions de culture données (climat, pratiques culturales, caractéristiques des sols), l'émission de méthane peut être estimée par corrélation avec la production de biomasse. Ainsi, la connaissance de ce paramètre est indispensable pour la modélisation de l'émission de méthane à l'échelle régionale et globale.

Une première approche pour l'estimation de l'émission de méthane peut donc être basée sur la relation, plus ou moins complexe, de la production de la NPP au cours des différents stades de développement, et de l'émission de méthane.

IV -5 Les modèles d'estimation de méthane

L'incertitude sur l'émission de méthane est liée au problème d'échelle. L'échelle à laquelle des informations sur l'émission de CH_4 pour des bilans globaux sont nécessaires (> 10 km à globale), est largement supérieure à celle à laquelle les mesures d'émission sont réalisées (< 100 m), qui est encore une fois plus grande que l'échelle à laquelle la production et l'oxydation du méthane ont lieu (< cm). Des estimations fiables et les prédictions futures d'émission de méthane par les rizières à l'échelle globale ne peuvent être obtenues que si ces différentes échelles sont reliées. C'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser des modèles qui relient la production et l'oxydation du méthane dans les sols rizicoles à l'échelle du champ, puis après étalonnage et validation, à un ensemble de champs. Pour cela, des données d'entrée, géoréférencées, régionales, sont de très grande importance (Denier van der Gon, 1996).

Ainsi, les données de télédétection qui permettent d'obtenir des données de biomasse, sur des régions d'au moins 100 x 100 km, présentent un intérêt certain. Couplées à un modèle d'émission de méthane, ces informations devraient permettre d'estimer plus précisément l'émission globale du méthane.

Plusieurs modèles empiriques ont été développés pour essayer d'estimer l'émission de CH_4 par les rizières et plus généralement, les écosystèmes inondés, à l'échelle du globe (Matthews et Fung, 1987 ; Aselmann et Crutzen, 1989). Cependant ils ont conduit à des estimations très peu précises avec des incertitudes de plus de 80 Tg/an (Batjes et Bridge, 1992).

Des modèles mécanistes ont également été développés tels que le modèle WMEM (Wetland Methane Emission Model) (Cao et al., 1996). Ce modèle a été développé pour estimer l'émission de méthane de l'ensemble des écosystèmes inondés. Il est basé sur l'hypothèse que la production primaire nette des plantes et la décomposition de la matière organique contrôle la disponibilité en substrat nécessaire aux méthanogènes. Le taux et l'équilibre entre la production et l'oxydation du méthane déterminent le taux d'émission du CH_4 dans l'atmosphère. Ces modèles, couplés aux données de climat, végétation, sol et distribution des zones inondées, sont utilisés pour calculer les estimations spatiales et saisonnières de méthane à la résolution de 1° latitude x 1° longitude. Potter, 1997, a également développé un modèle pour estimer l'émission de méthane à partir des zones inondées. Cependant, ce modèle n'a été testé et validé que dans les zones inondées des toundra d'Alaska.

Récemment, Aiju et Mingxing, (1996) ont développé un modèle d'émission de méthane par les rizières, qui a été validé en Chine du Sud. Les résultats du modèle, comparés aux mesures de flux de méthane réalisés sur des champs tests, ont montré une bonne précision (erreur inférieures à 10%) et ont permis d'expliquer les variations saisonnières de l'émission de méthane. Ce modèle prend en compte l'effet des conditions climatiques, de la gestion de l'eau de

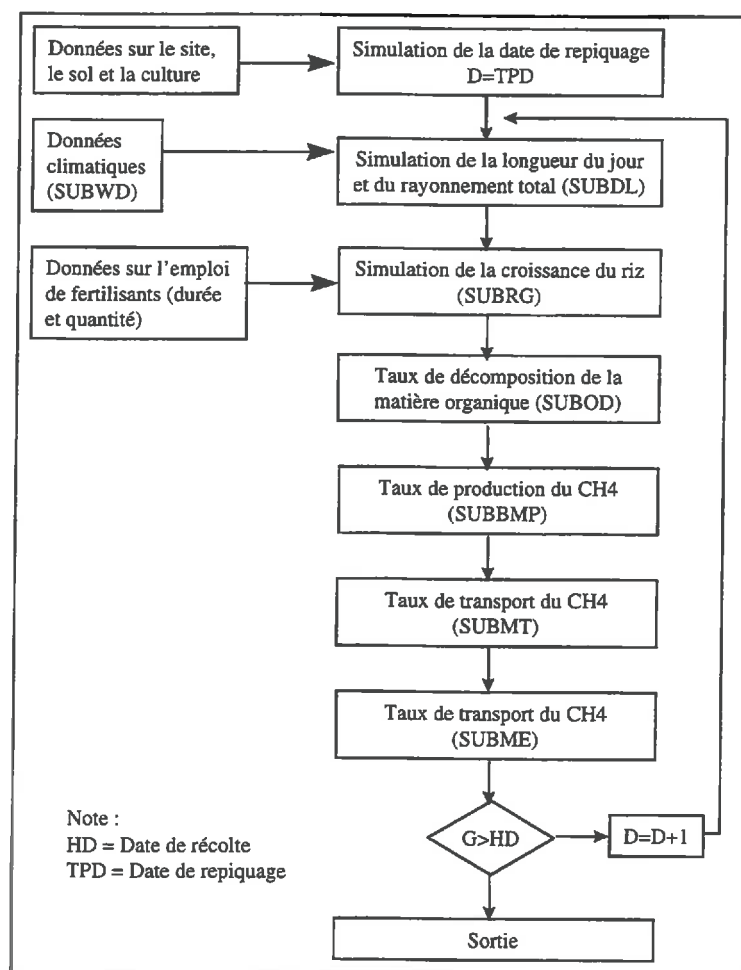


Figure 89 : Fonctionnement du modèle d'émission de méthane (d'après Aiju et Mingxing, 1996)

l'amendement et des types de sol. Il peut estimer l'émission de méthane à l'échelle du champ, du groupe de champs ou de la région. Il est constitué de parties clés qui sont : la croissance du riz, la décomposition de la matière organique ainsi que la production, l'efficacité du transport et les taux d'émission de méthane. La Figure 89 décrit le fonctionnement du modèle.

Les facteurs qui contrôlent l'émission de méthane sont la hauteur de la couche d'eau, et son historique durant la croissance de la plante, la température du sol, la fertilisation, les caractéristiques des sols et de la culture du riz et les pratiques culturales telles que la date de semis ou de repiquage. Pour l'instant, peu de données sont disponibles pour incorporer tous ces facteurs et seuls les effets de la gestion hydrique, de la température et de la fertilisation organique peuvent être intégrés dans le modèle. La hauteur de la couche d'eau et sa présence durant le cycle de croissance ainsi que certaines pratiques culturales et la croissance de la plante doivent être simulées.

Les paramètres d'entrée du modèle sont les suivants :

- Données climatiques : rayonnement solaire et quantité de nuages, précipitations maximales, températures minimum.
- Données sur le site et paramètres de culture : localisation (latitude, longitude), caractéristiques du sol, quantité d'eau, données de culture (surfaces cultivées, date de repiquage, période de croissance).
- Données supplémentaires : pratiques culturales (résidu de culture, fertilisation, caractéristiques du régime hydrique).

Or il a été démontré dans les chapitres précédents que les données de télédétection permettaient d'estimer avec une bonne précision la surface cultivée en riz, le nombre de cultures par an, la date de semis ainsi que la croissance des plantes (valeur de biomasse, et stade de développement). La connaissance de la production de biomasse des plantes, devrait permettre de limiter les incertitudes concernant l'effet de la fertilisation et des pratiques culturales sur la croissance de la plante, et donc d'estimer au mieux le processus de transport du méthane vers l'atmosphère à travers la plante.

Ce modèle, plus simple que ceux développés pour l'ensemble des écosystèmes inondés, décrit bien les mécanismes d'émission du méthane, tout en tenant compte de l'ensemble des facteurs qui contrôlent cette émission. Il nous paraît donc particulièrement adapté pour estimer l'émission de méthane à une échelle régionale, à partir des données de télédétection.

IV -6 Apport des données de télédétection

Il ressort des différentes études concernant les méthodes d'estimation de l'émission de méthane par les rizières et plus généralement, les zones inondées, que deux approches peuvent être envisagées, la première étant moins précise que la seconde, mais plus simple et plus rapide :

- 1) La première approche consiste à utiliser des relations empiriques entre l'émission de CH_4 et la production de biomasse. Cette approche peut être affinée en déterminant des relations plus étroites entre l'émission de CH_4 et la production de biomasse selon les stades de développement de la plante. D'autre part, les données de télédétection, qui permettent une bonne estimation des surfaces rizicoles, du nombre de récoltes par an et des valeurs de biomasse au cours du cycle de croissance devraient permettre une meilleure estimation de l'émission totale de méthane.
- 2) La deuxième approche consiste à utiliser les données de télédétection pour estimer avec plus de précision les paramètres d'entrée importants du modèle d'émission de CH_4 par les rizières. Ainsi, l'estimation de la date de semis, du nombre de récoltes par an, des surfaces cultivées en riz, et de la production de biomasse pour chaque stade de développement devrait permettre d'améliorer ces estimations.

Il faut cependant considérer certains paramètres importants qui influent sur l'émission du méthane par les rizières tels que les caractéristiques des sols, des pratiques culturales ou du climat. En effet, Denier van der Gon (1996) indique que les différences dans les types de sol, entraîne une grande variation de l'émission de méthane d'un site à l'autre. Toute extrapolation à l'échelle globale, à partir d'estimations faites sur des sites peu représentatifs ne saurait donc être précise.

Il nous paraît donc nécessaire de traiter le problème par zones agro-écologiques regroupant les régions du globe en zones homogènes en terme de climat, pratiques culturales et caractéristiques des sols. Cette classification régionale, peut, dans un premier temps, être basée sur la carte des sols du monde de la FAO (FAO-UNESCO, 1974-1981) et sur la base de données de Zobler (1986) ainsi que sur la classification de la FAO en zones agro-écologiques pour la production du riz (IRRI, 1993), puis affinée sur des informations concernant les pratiques culturales. L'estimation de l'émission de méthane sera ensuite calculée sur des sites caractéristiques de chacune de ces zones agro-écologiques par l'une des deux méthodes évoquées précédemment.

Si les données des satellites ERS ou RADARSAT sont utilisées, il sera possible de réaliser des inventaires exhaustifs d'émission de méthane, sur des surfaces de 100 x 100 km. Au sein de ces

zones, les taux de CH_4 pourront être déterminés pour des groupes de rizières homogènes avec des cycles de croissance communs. Ces estimations devront être validées par des mesures de flux de CH_4 effectuées sur les zones ou champs tests, puis extrapolées à l'échelle du globe.

Ces estimations pouvant être réalisées sur plusieurs régions du globe, grâce aux acquisitions des données de satellites, la quantification de l'émission de méthane par les rizières à une échelle globale ou régionale devrait donc être sensiblement améliorée par rapport aux méthodes actuelles qui consistent à extrapoler les résultats obtenus sur certains sites en Europe ou aux Etats-Unis à l'ensemble des rizières du monde.

Pour couvrir des zones plus importantes, un travail de changement d'échelle doit être entrepris. Les données des modes SCANSAR du satellite RADARSAT (50 à 100 m de résolution) pour une largeur de fauchée de 300 à 500 km, ou les modes « large bande » (150 m de résolution), ou « observation globale » (1000 m de résolution) pour une largeur de fauchée de 400 km, devraient permettre de couvrir des surfaces 9 à 25 fois plus importantes qu'avec les données ERS ou RADARSAT Standard. Cependant, des études doivent être menées pour déterminer si l'estimation des surfaces rizicoles, la détermination des dates de semis et le suivi de la croissance de la culture, sont encore possibles à ces résolutions, dans une optique d'estimation globale d'émission de CH_4 par les rizières. En effet, à ces échelles, les pixels de riz seront mixtes, constitués soit de rizières suivant des cycles de croissances décalés, soit de zones de riz et de non riz.

Selon Nazarenko et al. (1997), les données SCANSAR de RADARSAT sont adaptées à la cartographie régionale en Asie du Sud Est. D'autre part, les travaux de Malingreau (1986b) indiquent qu'avec des données satellites de NOAA GAC (Global Area Coverage) ayant une résolution de 4 km, il est possible d'observer les cycles de croissances des rizières à une échelle globale. Par contre, Frison et Mougin (1996) ont observé très peu de variation de la rétrodiffusion radar des rizières avec le diffusiomètre ERS-1 qui permet d'acquérir des images à une résolution spatiale de 50 km. Le choix de l'échelle sera donc un compromis entre la surface observée et la sensibilité de la rétrodiffusion à la croissance du riz.

L'apport des données satellites radar pour l'estimation de l'émission de méthane par les rizières reste encore à l'état de prospective. Des idées ont été proposées, qui permettent de penser que ces données présentent un potentiel intéressant. En effet, une telle approche devrait permettre d'améliorer les estimations actuelles, basées sur des mesures en champs effectuées dans des régions très peu représentatives des écosystèmes rizicoles irrigués du monde, et extrapolées à l'échelle du globe.

V - CONCLUSION

Les résultats précédents indiquent que les données ERS, et dans une moindre mesure, les données RADARSAT en mode SI peuvent être utilisées pour retrouver les informations suivantes :

- *Surfaces rizicoles : elles peuvent être déterminées par la cartographie des rizières en utilisant l'information multitemporelle des données radar. Les champs de riz sont identifiés en utilisant des techniques de rapport d'intensité. Une précision de plus de 85% a été obtenue. Un nombre de 3 dates par cycle est nécessaire pour une estimation précise des surfaces.*
- *Nombre de cultures par an : le nombre de cultures par an peut être déterminé en suivant le cycle de croissance de la culture de riz. La rétrodiffusion des rizières augmente du semis à la récolte. Ainsi une baisse soudaine et importante de la rétrodiffusion radar indique le début d'un nouveau cycle. En acquérant plusieurs images à différentes dates, durant l'année il est possible de déterminer le nombre de cultures par an, supportées par un champ.*
- *Rendement : le rendement peut être obtenu en utilisant les paramètres dérivés des données de télédétection comme paramètres d'entrée d'un modèle de production de riz. Ces paramètres sont la date de semis et des valeurs de biomasse de la plante au cours du cycle de croissance. La date de semis peut être obtenue par une inversion de la relation qui existe entre le nombre de jours après semis et la rétrodiffusion radar, qui permet de déterminer l'âge de la plante à la date d'acquisition radar, ce qui mène logiquement à la date de semis. Les valeurs de biomasse sont estimées en convertissant la rétrodiffusion radar d'un champ de riz, à une date donnée, en biomasse. Ceci est possible par l'inversion des relations existant entre la rétrodiffusion et la biomasse des plantes. Les rendements ont pu être estimés avec des erreurs inférieures à 10% et 15%, respectivement pour ERS et RADARSAT. Un minimum de 2 à 3 dates est nécessaire pour une estimation précise du rendement, la dernière date devant correspondre au moins au début du stade reproductif.*

Ces informations sont particulièrement intéressantes à la fois pour l'estimation de la production rizicole d'une région et pour le suivi de l'émission de méthane.

En effet la production d'une culture correspond au produit entre les surfaces cultivées et le rendement obtenu sur ces surfaces. De plus, il faut connaître le nombre de récoltes par an pour déterminer la production annuelle en riz d'une région.

D'autre part, l'émission de méthane dépend de la quantité de biomasse produite par la plante au cours de son cycle de croissance, ainsi que des surfaces cultivées (inondées) et du nombre de cultures par an. En effet, après la récolte, les champs ne sont plus inondés et produisent donc très peu de méthane. Par contre, si plusieurs cultures s'enchaînent, les champs ne resteront secs que durant une très courte période et l'émission de méthane sera alors beaucoup plus importante.

Conclusion Générale

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le suivi des écosystèmes rizicoles inondés reste d'une importance majeure à la fois en terme de production, à l'échelle du champ, d'une région ou d'un pays, et en terme d'émission de méthane à une échelle régionale ou globale. La majeure partie des rizières étant regroupées en Asie, où la forte couverture nuageuse limite l'acquisition de données optiques, les données radar apparaissent comme un outil à fort potentiel pour la gestion de ces écosystèmes.

L'objectif de ces travaux consistait donc à déterminer la capacité des données des satellites radar pour l'identification et le suivi des zones de cultures de riz, ainsi que la prévision des rendements, et d'une manière plus prospective, l'estimation de l'émission de méthane.

L'approche comprend 3 parties :

- Une étude des caractéristiques des écosystèmes rizicoles irrigués ou inondés dans le monde, ainsi que l'étude du développement de la plante au cours du cycle de croissance afin de bien cerner le contexte de l'étude.
- Une étude expérimentale comprenant l'analyse et la synthèse de l'évolution des différents paramètres de la plante, mesurés sur des sites géographiques où les conditions de croissance sont très différentes, ainsi que l'analyse du coefficient de rétrodiffusion des rizières extrait des données de plusieurs capteurs radar (ERS, RADARSAT, JERS), en fonction de certains de ces paramètres (âge, hauteur, biomasse). Ces résultats expérimentaux ont été expliqués physiquement et quantifiés par un modèle théorique de rétrodiffusion des rizières.
- Enfin, une troisième partie regroupe les différentes applications qu'il a été possible de développer pour répondre aux besoins de suivi des rizières. Ces applications sont basées sur les résultats de l'analyse expérimentale et ont pour objectif d'être indépendantes du site ou du type de rizière auquel elles s'appliquent.

De la première partie, il ressort notamment que les rizières peuvent présenter des caractéristiques très différentes en matière de pratiques culturelles ou de conditions de cultures. D'autre part, la plante présente la particularité d'être cultivée sur une couche d'eau qui reste présente jusqu'à la fin de son cycle de croissance.

La synthèse des données radar sur les champs de riz de deux sites tropicaux (Semarang et Jatisari, Indonésie) et d'un site tempéré (Akita, Japon) a montré que les coefficients de rétrodiffusion radar des rizières inondées ont un comportement temporel caractéristique, permettant de discriminer les rizières de tout autre type d'occupation du sol. Ces observations ont été interprétées par un modèle théorique, qui est basé sur une description réaliste des plantes de riz et qui considère la rétrodiffusion et l'effet d'agrégation des diffuseurs. Une bonne concordance a été obtenue entre les données expérimentales et les résultats théoriques. Le modèle indique que le mécanisme de diffusion dominant est la diffusion de la végétation, suivie (ou précédée) par une réflexion de la surface d'eau présente sur le sol. D'autre part, les différences qui existent entre les données des différents capteurs ont été validées et expliquées.

A l'issue de l'étude méthodologique, il a été possible de développer les méthodes suivantes répondant aux besoins de suivi des rizières :

- L'estimation des surfaces

En se basant sur le changement temporel de la rétrodiffusion il est possible d'appliquer une méthode robuste de cartographie des rizières. D'autres auteurs utilisent cette méthodologie avec succès.

- Le suivi de croissance et l'estimation du nombre de récoltes par an.

Pour les données ERS, le suivi de croissance peut se faire par l'inversion des relations entre le σ^0 des données ERS et l'âge, la hauteur ou la biomasse des plantes en cartes de classes de hauteur. Pour les données RADARSAT, la méthode de suivi de culture est basée sur la haute répétitivité temporelle des données, en identifiant les dates de mise en eau des champs de riz. Ainsi, ces méthodes permettent d'une part de suivre la croissance des rizières mais également, en déterminant le début d'un nouveau cycle, de connaître le nombre de cultures par an supportées par chaque champ.

- La prévision des rendements

Les données multitemporelles ERS et RADARSAT permettent d'estimer la date de semis et les valeurs de biomasse à différents stades de développement. En utilisant ces informations comme paramètres d'entrée du modèle de production de riz ORYZA, il est possible de simuler la croissance de la plante et de prévoir le rendement final de la culture.

Ces travaux de recherche démontrent que les données des satellites radar sont particulièrement adaptées à l'observation des rizières et que la cartographie, le suivi de croissance du riz, ainsi que l'estimation des rendements peuvent être entrepris à partir des données radar. Les données ERS sont apparues les mieux adaptées pour les applications grâce à la plus grande dynamique de leur rétrodiffusion radar. D'autre part, elles ont été testées à la fois sur des sites tropicaux, pour des plaines fertiles mais aussi pour des régions montagneuses moins fertiles, ainsi que sur des sites tempérés où les rizières ont un cycle de croissance plus long. Les relations entre la biomasse ou l'âge et le σ^0 établies pour les données ERS sont donc plus robustes que celles établies pour les données RADARSAT. Les résultats obtenus avec les données RADARSAT doivent encore être testés sur d'autres rizières aux conditions de cultures différentes, pour évaluer la robustesse des relations, et la validité des résultats.

- L'estimation de l'émission de méthane

Le couplage des données radar et du modèle de production ORYZA permet également de suivre la biomasse de la plante tout au long du cycle de croissance. En associant ces valeurs aux informations de surface, et au nombre de cultures par an, on peut envisager la possibilité de développer des méthodes pour estimer l'émission de méthane par les rizières à partir des données radar. Ce sujet est d'un intérêt majeur car les rizières restent une source importante d'émission de CH_4 . Une première approche prospective a permis de proposer des axes de recherche pour atteindre cet objectif.

Dans le futur, avant de passer à une phase opérationnelle, des travaux supplémentaires doivent être conduits pour mieux cerner les limites des méthodes présentées dans ces travaux. Il s'agit de tester l'ensemble des algorithmes sur des sites nouveaux et différents, d'évaluer quantitativement l'effet des conditions climatiques (vent), de la dimension des champs, de la topographie (riz en terrasses) et des pratiques culturales, en particulier l'impact des techniques modernes de semis.

Les résultats apparaissent déjà très prometteurs et l'utilisation des données ERS et RADARSAT et du futur capteur ASAR sur ENVISAT peut être d'ores et déjà envisagée.

Ces travaux illustrent que pour répondre à un problème d'observation de la terre, une approche physique, ainsi que la compréhension du milieu observé sont capitales. C'est à ce prix qu'il sera possible de développer des méthodes robustes qui pourront, par la suite, passer à une étape opérationnelle.

BIBLIOGRAPHIE

- Aiju D. et Mingxing W., 1996. « *Model for methane emission from rice fields and its application in Southern China* », *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 13, n°2, pp. 159-168.
- Alsemann I. et Crützen D.J., 1989. « *Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions* », *Journ. of Atmos. Chem.*, 8, 307-385.
- Anastasi C., Dowding M., Simpson V.J., 1992 « *Future CH₄ emission from rice production* », *Journal of Geophysical Research*, 97, 7521-7525.
- Aschbacher J., A. Pongsrihadulchai, S. Karnchanasutham, C. Rodprom, D. R. Paudyal et T. Le Toan, 1995. « *Assessment of ERS-1 data for rice crop mapping and monitoring* ». *Proceedings IGARSS'95*, Florence, 10-14 July 1995, pp.2183-2185.
- Bachelet D. et Neue H.U., 1993. « *Methane emissions from wetland rice areas of Asia* ». *Chemosphere*, 26,219-237.
- Bachelet D., Kern J., Tölg M., 1995. « *Balancing the rice carbon budget in China using a spatially distributed data* », *Ecological Modeling*,79,167-177.
- Badjes N.H. et Bridges E.M., 1992. « *A review of soil factors and processes that control fluxes of heat, moisture and greenhouse gases* ». *Technical Paper 23 - WISE Report 3 for the Netherlands national research programme on global air pollution and climate change*, 201 p.
- Banik A., Sen M., et Sen S.P., 1994. « *Factors affecting methane emission from rice field* », *Journal of Geophysical Research*, Paper Submitted.
- Barker R., Herdt R., Rose B., 1985. « *The rice economy of Asia* ». *Ressources for the Future*, Washington D.C., 324p.
- Bouman B.A.M., 1992. « *Linking physical remote sensing models with crop growth simulation models, applied for sugar beet* ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, pp. 2565-2581.
- Bouwman A.F., 1991. « *Agronomic aspects of wetland rice cultivation and associated methane emissions* ». *Biogeochemistry*, 15, 65-88.
- Bruniquel J., 1996. « *Contribution des données multi-temporelles à l'amélioration radiométrique et à l'utilisation d'images de radars à synthèse d'ouverture* ». Thèse de docteur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, No. 2245, 16 Février 1996.
- Bruniquel J., Lopes A., 1994. « *Analysis and enhancement of multi-temporal SAR data* ». *SPIE/EUROPTO Symposium*, Rome, Sept 1994, vol. 2315, pp. 342-353.
- Bruniquel J., Lopes A., 1997. « *Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery* ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, pp. 603-627.
- Cao M., Marshall S. et Gregson K., 1996. « *Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands : application of a process-based model* », *Journal of Geophysical Research*, 10, 14,399-14.414.
- Centeno H.G.S., Balbarez A.D., Fabellar N.G., Kropff M.J. et Matthews R.B., 1995. « *Rice production in The Philippines under current and future climates* ». In : *Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia* edited by R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bachelet and van Laar H.H., CAB International, Oxon, UK., pp. 237-250.
- Cicerone R.J., Shetter J.D. et Delwiche C.C., 1983. « *Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy* », *Journal of Geophysical Research*, 88, 11,022-021.11,024

- Cicerone, R.J. et Shetter J.D., 1981. « *Sources of atmospheric methane : measurements in rice paddies and a discussion* », Journal of Geophysical Research, 86, 7203-7209.
- Coyaud Y., 1950. « *Le riz : étude botanique, génétique, physiologique, agrologique et technologique appliquée à l'Indochine* ». Archives de l'office indochinois du riz, n°30.
- Crimmins T.R., 1985. « *Geometric filter for speckle reduction* », Applied Optics, vol. 24, n°10, pp. 1438-1443.
- Defeng Z. et Shaokai L., 1995. « *Rice production in China under current and future climates* ». In : Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia edited by R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bachelet and van Laar H.H., CAB International, Oxon, UK., pp. 217-235.
- Denier van der Gon H., 1996. « *Methane emission from wetland rice fields* », Thèse de Docteur de Spécialité, Wageningen Agriculture University, ISBN 90-5485-591-6, 25 Octobre 1996, 182 p.
- Denier van der Gon H., Neue H.U., Lantin R.S., et Wassmann R., 1992. « *Controlling factors of methane emission from rice fields* ». In : Proceeding of International Workshop on World Inventory of Soil Emission Potentials, edited by N.H. Batjes et E.M. Bridges, pp. 81-92, ISRIC, The Netherlands.
- Dobelmann J.-P., 1976. « *Riziculture pratique, Tome. I : riz irrigué* ». Presses Universitaires de France, Paris, 229p.
- Food and Agriculture Organization - UNESCO, 1974-1981. « *Soil map of the world* », vol. 1-10. Food and Agricultural Organization of United Nations, Paris, 62 p.
- Frison P.L., Mougin E., 1996. « *Monitoring global vegetation dynamics with ERS-1 wind scatterometer data* », International Journal of Remote Sensing, vol. 17, pp. 3201-3218.
- Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S., et Holtzman J.C., 1982. « *A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise* ». IEEE Transaction On PAMI, vol. 4, pp. 185-190.
- Gastellu-Etchegorry J.P., 1988. « *Predictive models for remotely-sensed acquisition in Indonesia* ». International Journal of Remote Sensing, vol. 9, pp. 1277-1294.
- Holzapfel-Pschorn A. et Seiler W., 1986. « *Methane during a cultivation period from an Italian rice paddy* », Journal of Geophysical Research, 91, 11,803-11,814.
- Horie T., 1987. « *A model for evaluating climatic productivity and water balance of irrigated rice and its application to Southeast Asia* ». Southeast Asian Studies, 25, 62-74.
- Horie T., Nakawawa H., Ohnishi M., et Nakno J., 1995. « *Rice production in Japan under current and future climates* ». In : Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia edited by R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bachelet and van Laar H.H., CAB International, Oxon, UK., pp. 143-164.
- Huang Y., Sass R.L., Fisher F.M., 1997a. « *Methane emission from Texas rice paddy soils. 1. Quantitative multi-year dependence of CH₄ emission on soil, cultivar and grain yield* ». Global Change Biology, 3, 479-489.
- Huang Y., Sass R.L., Fisher F.M., 1997b. « *Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to methane emission* ». Global Change Biology, 3, 491-500.
- Huet M., 1983. « *Evolution des paramètres de structure et de biomasse d'un couvert de blé. Utilisation des techniques de télédétection micro-ondes* ». Thèse de Docteur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 142 p.
- Ingram J.S. (Ed.), 1994. « *Model and experimental metadata* ». Report of the GCTE « Rice Ecosystems » Workshop, IRRI, Los Baños, Philippines, 21-22 March 1994. GCTE Focus 3 Associate Office, Oxford, UK, pp. 16-17.
- Inoue Y., 1997. « *Remote sensing of physiological parameters for monitoring and predicting rice growth and yield* ». Report of the Development of Wide-area Systems for Monitoring and Predicting Rice Growth and Yield project, No. 06556003, Kyoto University Press, Japan, pp. 101-124.

- IRRI, 1993.** « 1993-1995 IRRI rice almanac ». International Rice Research Institute, Manila, Philippine, 142 p.
- Karam M.A., Fung A.K., et Antar Y.M.M., 1988.** «Electromagnetic wave scattering from some vegetation samples». IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 26, n°6, pp. 799-808.
- Kiniry J.R., Rosenthal W.D., Jackson B.S. et Hoogenboom G., 1991.** «Predicting leaf development of crop plants». In : Predicting Crop Phenology (T. Hodges, ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 29-42.
- Kobayashi K., 1994.** «A very simple model of crop growth : derivation and application». JICA Short-term Expert Report to ADRC in Northeast Thailand. ADRC, Khon Kaen, Thailand, 1994, 13 p.
- Koyama T., 1963.** «Gaseous metabolism in lake sediments and paddy soils and the production of atmospheric methane and hydrogen », Journal of Geophysical Research, 68, 3971-3973.
- Kropff M.J. et van Laar H.H., 1993.** «Modelling crop-weed interactions». CAB International, Wallingford, UK, and International Rice Research Institute, Manila, The Philippines, 274 pp.
- Kropff M.J., Cassman K.G., Penning de Vries F.W.T. et van Laar H.H., 1993.** «Increasing the yield plateau in rice and the role of global climate change ». J. Agr. Met., 48, 795-798.
- Kropff M.J., Matthews R.B., van Laar H.H., et Ten Berge H.F.M., 1995.** «The rice model ORYZA1 and its testing». In : Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia edited by R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bachelet and van Laar H.H., CAB International, Oxon, UK., pp. 27-50.
- Kropff M.J., van Laar H.H. et Matthews R.B. (Eds.), 1994.** «ORYZA 1 : An ecophysiological model for irrigated rice production». SARP Research Proceedings, September 1994, ISBN 90-73384-23-0, AB-DLO/IRRI, 110p.
- Kuan D.T., Sawchuk A.A. et Strand T.C., 1987** «Adaptive restoration of images with speckle», IEEE Trans. on ASSP, vol. ASSP-35, n°3, pp. 373-383.
- Kurosu T., Fujita M. et Chiba K., 1995.** «Monitoring of rice crop growth from space using ERS-1 C-band SAR». IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, n°4, pp. 1092-1096.
- Laar H.H. van, Goudriaan J., et van Keulen H. (eds), 1992.** «Simulation of Crop Growth for Potential and Water-limited Production Situations (as applied to spring wheat)». CABO-TT Simulation Reports 27, Centre for Agrobiological Research, Wageningen, 72pp.
- Laur H., Bally P., Meadows P., Sanchez J., Schaettler B., et Lopinto E., 1996.** «Derivation of the backscattering coefficient σ^0 in ERS.SAR.PRI products ». ESA/ESRIN, Issue 2, Rev. 2, 28 June 1996, 41 p.
- Le Toan T., 1977.** «Etude spécifique d'une culture (riz) par télédétection : cartographie et évaluation de production». Proceedings of the 4th Canadian Symposium on Remote Sensing, Québec City, May 1977.
- Le Toan T., 1995.** «Ground data collection guidelines ». In : Satellite assessment for rice in Indonesia. SARI Project, Phase 1B, Final Report SCOT CONSEIL-CESBIO, n°94/CNES/0381, pp. 90 - 101.
- Le Toan T., Laur H., Mougin E., Lopes A., 1989.** «Multitemporal and dual-polarization observations of agricultural vegetation covers by X-band SAR images». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, n°6, pp. 709-717.
- Le Toan T., Ribbes F., Floury N., Wang L., Kong J.A., Kurosu T. et Fujita M., 1997.** «Rice Crop Mapping and Monitoring Using ERS-1 Data Based on Experiment and Modeling Results ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 35, n°1, pp 41-56.

- Le Vine D.M., Schneider A., Lang R.H., Carter H.G., 1985.** « *Scattering from thin dielectric disks* ». IEEE Transaction on Ant. and Prop., vol. 33, n°12, pp. 1410-1413.
- Leblon B., Guerif M., et Baret F., 1991.** « *The use of remotely sensed data in estimation of PAR Use Efficiency and biomass production of flooded rice* ». Remote Sensing Environment, 38, 147-158.
- Lee J.S., 1983.** « *Digital image smoothing and the sigma filter* », Computer Vision, Graphics and Image Processing, n°24, pp. 255-269.
- Liew S.C., Kam S.P., Tuong T.P., Chen P., Minh V.Q., Balababa L. et Lim H., 1997a.** « *Delineation of rice cropping systems in the Mekong River Delta using multitemporal ERS synthetic aperture radar* ». Proceedings of the 3rd. ERS Symposium, Florence, vol. I, pp. 153-158, Mar. 17-21 1997.
- Liew S.C., Kam S.P., Tuong T.P., Chen P., Minh V.Q., et Lim H., 1997b.** « *Application of Multitemporal ERS-2 Synthetic Aperture Radar in Delineating Rice Cropping Systems in the Mekong River Delta, Vietnam* ». Proceedings IGARSS'97, Singapore, vol. II, pp. 1084-1086. 03-08 Août 1997.
- Lindau C.W., Bollich P.K., Delaune R.D., Patrick Jr. W.H., Law V.J., 1991.** « *Effect of urea fertilizer and environmental factors on methane emissions from a Louisiana, USA rice field* », Plant and Soil, 136, 195-203.
- Lopes A. et Séry F., 1997.** « *Optimal speckle reduction for the product model in multilook polarimetric data and the complex Wishart distribution* », IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 35, n°3, pp. 632-647.
- Lopes A., Nezry E., Touzi R., Laur H., 1993.** « *Structure detection and statistical adaptative speckle filtering in SAR images* ». International Journal of Remote Sensing, vol. 14, pp. 1735-1758.
- Malingreau J.-P., 1986a.** « *Monitoring tropical wetland rice production systems : a test for orbital remote sensing* ». In : Eden M.-J. et Parry J.-T., « *Remote Sensing and Tropical Land Management* ». John Wiley & Sons Ltd., pp. 279 - 305.
- Malingreau J.-P., 1986b.** « *Global vegetation dynamics : satellite observations over Asia* ». International Journal of Remote Sensing, vol°14, pp. 1517-1546.
- Matthews E. et Fung I., 1987.** « *Methane emission from natural wetlands : global distribution, area, and environmental characteristics of sources* », Global Biogeochemical Cycles, 1, 61-86.
- Matthews R.B. et Hunt L.A., 1994.** « *A model describing the growth of cassava (Manihot esculenta L. Crantz)* ». Field Crop Res., 36, 69-84.
- Mendez del Villar P., 1994.** « *Le marché international du riz* ». Agriculture et développement, n°2-Mai 1994, pp15-19.
- Minami K. et Neue H.-U., 1994.** « *Rice paddies as a methane source* ». Climatic Change 27, 13-26.
- Mitchell P.L., 1996.** « *Comparison of five models of rice yield showing the effects of change in temperature and in carbon dioxide concentration* ». Report to the GCTE Rice Network, 29th February 1996, 38 pp.
- Mohan S., Mehta N. S., Mehta R. L., Patel P., Patel I. D., Patel M. R., Patel R. B., 1992.** « *Monitoring of paddy crop at 5.0 Ghz* ». Scientific note SAR/RCA/RSAG/SIR-C/SN/01/92, Space Application Centre (ISRO), Ahmedabad 380 053, INDIA, 31 p.
- Mohandass S., Kareem A.A., Ranganathan T.B. et Jeyaraman S., 1995.** « *Rice production in India under current and future climates* ». In : Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia edited by R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bachelet and van Laar H.H., CAB International, Oxon, UK., pp. 165-181.

- Moran M.S., Inoue Y., et Barnes E.M., 1997. « Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management ». *Remote Sensing of Environment*, 61, 319-346.
- Moran M.S., Maas S.J. et Pinter P.J. Jr., 1995. « Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production ». *Remote Sensing Review*, 12, 335-353.
- Murata Y. et Matsushima S., 1975. « Rice ». In : *Crop Physiology*, Lt. Evans (ed.), Cambridge University Press, pp. 73-99.
- Murthy C.S., Thiruvengadachari S., Raju P.V. et Jonna S., 1996. « Improved ground sampling and crop yield estimation using satellite data ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, pp. 945-956.
- Nazarenko D.M., Mitchell G., et Staples G.C., 1997. « Use of RADARSAT SCANSAR products for regional mapping in Southeast Asia », *Proceedings IGARSS'97*, Singapour, 03-08 Aout 1997, pp. 1060-1062.
- Okamoto K., et Fukuhara M., 1996. « Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each mixel of Landsat TM ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, pp. 1735-1749.
- Oliver C. et Quegan S., 1998. « Understanding Synthetic Aperture Radar Images ». Artech House ed., 479 p.
- Parashar D.C., Rai J., Gupta P.K., et Singh N., 1991. « Parameters affecting methane emission from paddy fields », *Indian J. Radio and Space Phys.*, 20, 12-17.
- Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., ten Berge H.F.M., et Bakema A., 1989. « Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops ». Pudoc, Wageningen and IRRI, Los Baños, 271 pp.
- Potter C.S., 1997. « An ecosystem simulation model for methane production and emission from wetlands », *Global Biogeochemical Cycles*, 11, 495-506.
- Rhode H., 1990. « A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect ». *Science*, 248, 1217-1219.
- Ribbes F. et Le Toan T., 1998a. « Rice field mapping and monitoring using RADARSAT data ». *International Journal of Remote Sensing*. In press.
- Ribbes F. et Le Toan T., 1998b. « Coupling radar data and rice production model for yield estimation ». Submitted to *Remote Sensing of Environment*, July 1998.
- Rignot E.J.M., et Van Zyl J.J., 1993. « Change detection techniques for ERS-1 SAR data ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, vol. 31, n° 4, pp. 896-906.
- Rosenqvist A. et Oguma H., 1995. « Phenological characteristics of cultivated vegetation covers in JERS-1 and ERS-1 Synthetic Aperture Radar data - preliminary results ». *Proc. of the International Symposium on Vegetation Monitoring*, Chibe, Japan, 29-31 August 1995, pp. 194-198.
- Rosenqvist A., 1998. « Temporal and spatial characteristics of irrigated rice in JERS-1 L-band SAR data ». *International Journal of Remote Sensing*, In Press.
- Running S.W., Nemani R.R., Peterson D.L., Band L.E., Potts D.F., Pierce L.L. et Spanner M.A., 1989. « Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation ». *Ecology*, 70(4), 1090-1101.
- Safa F. et Flouzat G., 1989. « Speckle removal on radar imagery based on mathematical morphology », *Signal Processing*, vol. 16, No. 4, pp 319-333,
- Sass R.L., Fisher F.M. et Harcombe P.A., 1990. « Methane production and emission in a Texas rice field ». *Global Biogeochemical Cycles*, 4, 47-68.
- Sass R.L., Fisher F.M., Lewis S., Jund M.F. et Turner F.T., 1994. « Methane emission from rice fields : effect of soil properties ». *Global Biogeochemical Cycles*, 8, 135-140.

- Schütz H., Seiler W., et Conrad R., 1989. « Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies », *Biogeochemistry*, 7, 33-53.
- SCOT CONSEIL - CESBIO, 1995. « Satellite assessment for rice in indonesia ». SARI Project Phase 1 B, Rapport Final, n° 94/CNES/0381, 101 p.
- Sebacher D.I., Harriss R.C., Bartlett K.B., Sebacher S.M., et Grice S.S., 1986. « Atmospheric methane sources : Alaska tundra bogs, and alpine fen, and a subarctic boreal marsh », *Tellus B*, 38, 1-10.
- Seiler W., Holzapfel-Pschorn A., Conrad R., Scharffe D., 1984. « Methane emission from rice paddies », *Journal of Atmos. Chem.*, n°1, pp. 241-268.
- Shepherd N., 1997. « Extraction of Beta Nought and Sigma Nought from RADARSAT CDPF Products ». Report n°. AS97-5001, 10 p.
- Shi J., Dozier J., Rott H., 1994. « Snow mapping in alpine regions with synthetic aperture radar », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, vol. 32, n°1, pp.152-158.
- Shibayama M., et Akiyama T., 1986. « Estimated grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements ». *Remote Sensing of Environment*, 36, 45-51.
- Shimada M., 1993. « Users's guide to NASDA's SAR products ». Technical Report HE-930014, March 10, 1993, 25 p.
- Shin J.C. et Lee M.H., 1995. « Rice production in South Korea under current and future climates ». In : *Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia* edited by R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bachelet van Laar H.H, CAB International, Oxon, UK., pp. 199-215.
- Singh S., Ibrahim Y.B., et Wan Sulaiman, 1995. « Rice production in Malaysia under current and future climates ». In : *Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia* edited by R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bachelet van Laar H.H, CAB International, Oxon, UK., pp. 183-197.
- Singh, U., Ritchie, J.T., Godwin, D.C., 1993. « A User's Guide to CERES Rice - V2.10 ». International Fertiliser Development Centre, Muscle Shoals, 131pp.
- Spitters C.J.T., van Keulen H., et van Kraalingen D.W.G., 1989. « A simple and universal crop growth simulator : SUCROS87 ». In : *Simulation and Systems Management in Crop Protection* (R. Rabbinge et al., eds). Pudoc, Wageningen, pp.147-181.
- Steele L.P., Fraser P.J., Rasmussen R.A., Khalil M.A.K. et Thoring T.J., 1987. « The global distribution of methane in the troposphere », *Journ. of Atmos. Chem.*, 5, 125-171.
- Steele P., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Tans P.P., Martin R.C., Masarie K.A., 1992. « Slowing down of the global accumulation of atmospheric methane during the 1980s ». *Nature*, 358, 313-316.
- Swaminathan M.S., 1984. « Rice ». *Scientific American*, 250(1), 80-85 ; 90-93.
- Taylor J.A., Brasseur G.P., Zimmerman P.R., Cicerone R.J., 1991. « A study of the sources and sinks of methane and methyl chloroform using a global three-dimensional Lagrangian tropospheric tracer transport model ». *Journal of Geophysical Research*, 96, 3013-3044.
- Touzi R., 1988. « Analyse d'images radar en télédétection : améliorations radiométriques, filtrage du speckle et détection des contours ». Thèse de docteur de Docteur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, No. 258, 4 Mars 1998.
- Tsang L., Ding K.-H., Zhang G., Hsu C.C. et Kong J.A., 1995. « Backscattering enhancement and clustering effects of randomly distributed dielectric cylinders overlying a dielectric half space based on Monte-Carlo simulations ». *IEEE Transaction on Ant. and Prop.*, vol. 43, n°5, pp. 488-499.
- Turner M.D. et Congalton R.G., 1998. « Classification of multi-temporal SPOT-XS satellite data for mapping rice fields on a West African flood plain ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, 21-41.

- Ulaby F.T. et El-Rays M.A., 1987. "Microwave dielectric spectrum of vegetation - Part II : Dual-dispersion model". IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 25, n°5, pp. 550-557.
- Ulaby F.T., Moore R.K., et Fung A.K., 1986. «Microwave Remote Sensing Active and Passive», vol. III : From Theory to Application, Artech House, 1986.
- Van Zyl J.J., Chapman B.D., Dubois P., et Shi J., 1993 «The effect of topography on SAR calibration». IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 31, n°5, pp. 1036-1043
- Vergara B.S. et Chang T.T., 1985. «The flowering response of the rice plant to photoperiod». A review of the literature. Report of the International Rice Research Institute, Los Baños, The Philippines, 61 pp.
- Vergara B.S., 1980. «Rice plant growth and development». In : Rice Production and Utilization, AVI Pub. co., Westport, Conn., pp. 78-86
- Wang Z.P., Delaune R.D., Masscheleyn P.H., Patrick Jr W.H., 1980. «Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil». Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 382-385.
- Watanabe T., 1988. «An attempt to estimate rice yield in Kyushu district using Landsat MSS data». NIAES Bulletin, 4, 21-35.
- Weydahl D.J., 1992. «Temporal change detection in ERS-1 SAR images». Proceedings IGARSS'92, Houston, USA, pp. 1346-1348
- Whiting G.J. et Chanton J.P., 1993. «Primary production control of methane emission from wetlands», Nature, 364, 794-795.
- Wiegand C.L., Richardson A.J. et Nixon R.J., 1986. «Spectral components analysis : a bridge between spectral observations and agrometeorological crop models». IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing vol. 24, pp. 90-98.
- Williams, C. N., 1975. «Rice (*Oryza Sativa*)». In : The Agronomy of the Major Tropical Crops, Oxford University Press, Kuala Lumpur, pp. 66-83.
- Yin X. et Qi C., 1994. «Studies on the rice growth calendar model (RICAM) and its application». Act. Agron. Sinica., 20, 339-346.
- Yueh S.H., Kong J.A., King Jao J., Shin R.T., et Le Toan T., 1992. "Branching model for vegetation". IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 30, n°2, pp. 390-402.
- Yun S., Cuizhen W., Xiangtao F., Hao L., 1997. «Estimation of rice growth status using radarsat data». Proceedings IGARSS'97, Singapore, vol. II, pp. 1430-1432. 03-08 Août 1997.
- Zobler L., 1986. «A world soil file for global climate modeling». NASA Technical Memorandum # 87802, USA.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

I - LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des différents écosystèmes rizicoles dans le monde a) par surface, b) par production (source : IRRI, 1993).....	17
Figure 2 : Répartition des zones agro-écologiques en Asie du Sud-Est (d'après IRRI, 1993)	20
Figure 3 : Evolution de la biomasse sèche du riz selon les différents cycles de croissance (d'après Murata et Matsuhima, 1975).....	23
Figure 4 : Comparaison des stades de croissance d'une variété hâtive (120 jours) et d'une variété tardive (150 jours) en milieu tropical (d'après Vergara, 1980).....	24
Figure 5 : La panicule (IRRI, 1993).....	25
Figure 6 : Stade floraison (source : IRRI, 1993).....	25
Figure 7 : Principe du radar imageur	31
Figure 8 : Domaine spectral des hyperfréquences et désignation des fréquences radar	31
Figure 9 : Représentation des polarisations incidentes horizontale et verticale.	32
Figure 10 : Sites d'Etude en Indonésie : Jatisari et Semarang	35
Figure 11 : Site d'Etude au Japon : Akita	35
Figure 12 : Plaine de Jatiluhur.....	36
Figure 13 : Les campagnes de mesures - rizières à différents stades de croissance	39
Figure 14 : Mesure de la géométrie de plantation	40
Figure 15 : Mesure des paramètres de la plante.....	40
Figure 16 : Hétérogénéité du couvert	40
Figure 17 : Mesure de l'inclinaison des tiges (a), de l'inclinaison et de l'angle de courbure des feuilles (b) et de l'inclinaison des panicules (c).....	41
Figure 18 : Evolution de la hauteur des plantes au cours du cycle de croissance pour l'ensemble des sites d'étude.....	42
Figure 19 : Evolution de la biomasse des plantes au cours du cycle de croissance pour l'ensemble des sites d'étude	42

Figure 20 : Evolution de la hauteur des plantes au cours du cycle de croissance (Jatisari).....	43
Figure 21 : Evolution de la biomasse humide au cours du cycle de croissance (Jatisari)	43
Figure 22 : Teneur en eau des plantes au cours du cycle de croissance.....	43
Figure 23 : Densité des tiges	44
Figure 24 : Densité des feuilles	44
Figure 25 : Diamètre des tiges	45
Figure 26 : Longueur des feuilles	45
Figure 27 : Largeur des feuilles.....	45
Figure 28 : Epaisseur des feuilles	45
Figure 29 : Angles d'inclinaison et de courbure des tiges et des feuilles (Jatisari).....	46
Figure 30 : Diamètre des touffes à différentes hauteurs (Jatisari)	46
Figure 31 : Calendrier d'acquisition des données ERS sur le site de Semarang.....	47
Figure 32 : Calendrier d'acquisition des données ERS au site d'Akita.....	47
Figure 33 : Image ERS acquise le 06/03/1994	48
Figure 34 : Calendrier d'acquisition des données RADARSAT sur le site de Jatisari	49
Figure 35 : Image RADARSAT Mode Standard S1 acquise le 18/11/1996	50
Figure 36 : Image RADARSAT Mode Fin F3 acquise le 15/11/1996.....	51
Figure 37 : Variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières.....	56
Figure 38 : Variation de la rétrodiffusion des rizières en fonction de la hauteur des plantes.....	56
Figure 39 : Variation de la rétrodiffusion des rizières en fonction de la biomasse humide	56
Figure 40 : Simulation de la succession des cultures à Semarang	57
Figure 41 : Variation du σ° en fonction (a) du nombre de jours après semis, (b) de la hauteur des plantes, (c) de la biomasse des plantes (RADARSAT, mode S1 : C-HH-23°)	58
Figure 42 : Evolution du σ° du riz en fonction de la hauteur pour ERS et RADARSAT	59
Figure 43 : Evolution du σ° du riz en fonction de la biomasse pour ERS et RADARSAT	59
Figure 44 : Simulation de la succession des cultures de riz pour le site de Jatisari	60
Figure 45 : Comparaison de la rétrodiffusion du riz pour les modes S1 ($\theta=23^{\circ}$) et F3 ($\theta=43^{\circ}$) de RADARSAT	60
Figure 46 : Variation temporelle de la rétrodiffusion des rizières à l'aide des données JERS-1 (bande L) acquises en Malaisie (d'après Rosenqvist et Oguma, 1995)	61

Figure 47 : Variation temporelle du • • de rizières plantées selon des directions de rangée différentes (d'après Rosenqvist et Oguma, 1995).....	62
Figure 48 : Les différentes composantes du signal radar rétrodiffusé par une rizière.....	63
Figure 49 : Description du champ de riz par le modèle de riz MIT/CESBIO.....	64
Figure 50 : Configuration du modèle de riz MIT/CESBIO.....	66
Figure 51 : Comparaison entre le modèle théorique de rétrodiffusion des rizières et les données expérimentales	69
Figure 52 : Détermination de la contribution des différents mécanismes de diffusion	70
Figure 53 : Simulation théorique des coefficients de rétrodiffusion radar pour des cycles de croissance courts et longs et comparaison avec les données de terrain.	71
Figure 54 : Simulation de la rétrodiffusion de rizières plantées avec un espacement entre rangées de 16 cm et un espacement entre plantes de 6cm pour la configuration de JERS (a) et de ERS (b).	72
Figure 55 : Simulations théoriques de la rétrodiffusion pour les configurations de RADARSAT et ERS et comparaison avec les mesures expérimentales.	74
Figure 56 : Simulations théoriques de la rétrodiffusion des rizières pour les configurations C-HH et C-VV 23° pour les paramètres d'entrée du site de Semarang.....	75
Figure 57 : Evolution de la différence entre les σ_{HH}^o et σ_{VV}^o théoriques en fonction de la biomasse des plantes. Les simulations ont été réalisées en bande C et pour un angle d'incidence de 23°	76
Figure 58 : Simulations théoriques de la rétrodiffusion pour la configuration C-HH et pour des incidences de 23 et 43°, et comparaison avec les mesures expérimentales.	77
Figure 59 : Nombre de vues (L) nécessaire pour détecter un certain niveau de $\Delta\sigma^o$ pour une erreur donnée (%), sous hypothèse de non corrélation des pixels (source : Bruniquel, 1996).	86
Figure 60 : Images 3 vues (a) du site (23 x 25 km) de Semarang (ERS) au 06/03/94, (b) du site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT) au 18/11/96.....	88
Figure 61 : Images après application du filtre multitemporel (a) du site (23x25 km) de Semarang (ERS) au 06/03/94, (b) du site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT) au 18/11/96.	91
Figure 62 : images après application du filtre multitemporel suivi du filtre spatial (a) du site (23x25 km) de Semarang (ERS) au 06/03/94, (b) du site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT) au 18/11/96.....	91
Figure 63 : Comparaison entre le résultat du rapport des images (16/02/94) / (06/03/94) et la simulation de la succession des cultures (site de Semarang)	93

Figure 64 : Image du changement temporel maximal pour (a) le site (23x25 km) de Semarang (ERS) et (b) le site (50x50 km) de Jatisari (RADARSAT)	94
Figure 65 : Résultat de la segmentation riz/non riz pour (a) le site (23 x 25 km) de Semarang (ERS), (b) le site (50 x 50 km) de Jatisari (RADARSAT).....	95
Figure 66 : Cartes des rizières de Semarang (ERS)	96
Figure 67 : Image SPOT du 26 Mai 1994.....	97
Figure 68 : Cartes de rizières de Jatisari (RADARSAT)	98
Figure 69 : Validation de la carte riz/non riz obtenue au site de Jatisari (RADARSAT) dans la géométrie de l'image radar	99
Figure 70 : Région montagneuse issue de l'image ERS de Semarang (14x11,5 km) : (a) Composition colorée , (b) Résultat de la cartographie riz / non riz.....	101
Figure 71 : Carte des classes de hauteur au site de Semarang (ERS)	108
Figure 72 : Simulation de la succession des cultures et détermination des Golongans au site de Jatisari.....	110
Figure 73 : Carte des Golongans du site de Jatisari (RADARSAT) 50 x 50 km	111
Figure 74 : Schéma de fonctionnement du modèle ORYZA (source : Kropff et al., 1994).....	118
Figure 75 : Evolution des coefficients d'allocation pck (%) en fonction du stade de développement (DVS)	123
Figure 76 : Comparaison entre les biomasses totales de la plante et de la panicule simulées et mesurées. Les simulations ont été réalisées avec le modèle ORYZA en utilisant les informations de pratiques culturales, les dates de semis, et les valeurs de biomasse aérienne totale collectées aux sites de (a) Tsukuba, (b) Cikalongsari et (c) Jatisari comme paramètres d'entrée.....	125
Figure 77 : Comparaison entre les simulations et les mesures du nombre de grains par ha. Les simulations ont été réalisées en utilisant les informations de pratiques culturales, les dates de semis et les valeurs de biomasse aérienne totale collectées sur les champs de (a) Cikalongsari et (b) Jatisari comme paramètres d'entrée du modèle ORYZA.	126
Figure 78 : Comparaison entre le rendement final mesuré et simulé (poids sec des grains de riz - kg/ha). Les simulations ont été réalisées en utilisant les informations de pratiques culturales, les dates de semis et les valeurs de biomasse aérienne totale collectées au site de Tsukuba comme paramètre d'entrée du modèle ORYZA.	126

Figure 79 : Comparaison entre les simulations obtenues en utilisant l'ensemble des données de terrain et celles obtenues à partir des valeurs standards pour les paramètres culturaux : NTR (nombre de jours entre le semis et le repiquage), NPLH (nombre de plantes par touffes) et NH (nombre de touffes par m ²) à (a) Tsukuba, (b) Jatisari et (c) Cikalongsari.	127
Figure 80 : Relation entre le σ^0 et l'âge de la plante pour (a) RADARSAT, (b) ERS	129
Figure 81 : Relation entre le σ^0 et la biomasse sèche pour (a) RADARSAT, (b) ERS	129
Figure 82 : Comparaison entre la biomasse aérienne totale et le poids sec des panicules mesurés et simulés en utilisant les dates de semis et les valeurs de biomasse déduites des données RADARSAT	131
Figure 83 : Comparaison entre le rendement final simulé en utilisant les dates de semis et les valeurs de biomasse déduites des données RADARSAT et celles mesurées sur les champs de Cikalongsari et Jatisari.	132
Figure 84 : Comparaison entre le rendement théorique moyen de la région de Jatisari, et les rendements simulés en utilisant la date de semis et les valeurs de biomasse déduites des données RADARSAT pour des champs appartenant aux a) Golongan I, b) Golongan II, c) Golongan III.	133
Figure 85 : Comparaison entre le rendement final simulé en utilisant les paramètres d'entrée issus des mesures de terrains (pratiques culturales, date de semis, biomasse aérienne) et ceux issus des données ERS pour les champs (a) Dempet and (b) Gajah.	134
Figure 86 : Comparaison entre les rendements mesurés et les rendements simulés en utilisant les paramètres d'entrée (pratiques culturales, date de semis, biomasse) issus des données ERS pour les champs (a) Kuwu et (b) Ambarawa.....	134
Figure 87 : Effets des changements climatiques globaux sur les rizières (source : IRRI, 1993)	138
Figure 88 : Emission de méthane par les plantes de riz (source : IRRI, 1993).....	142
Figure 89 : Fonctionnement du modèle d'émission de méthane (d'après Aiju et Mingxing, 1996).....	149

II - LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principaux systèmes rizicoles utilisés en Asie (source : Barker et al., 1985).....	21
Tableau 2 : Caractéristiques des principaux capteurs radar.....	32
Tableau 3 : Caractéristiques des modes d'acquisition de RADARSAT.....	33
Tableau 4 : Paramètres des panicules et des grains au stade 130 jours (Jatisari).....	46
Tableau 5 : Exemple de valeurs de σ° extraites à 2 dates : 16/02/94 et 06/03/94.....	56
Tableau 6 : Valeurs du σ°_{HH} et σ°_{VV} de champs en début de cycle (données SIR-C, $\theta=46^{\circ}$) pour les bandes C et L.....	58
Tableau 7 : Valeurs de σ° (dB) de rizières en fin de cycle, obtenues à partir des données multi- incidence (modes Standards 1 à 7) de RADARSAT (Jatisari).....	61
Tableau 8 : Paramètres d'entrée pour le modèle théorique de rétrodiffusion des rizières du site de Semarang.....	68
Tableau 9 : Paramètres d'entrée pour le modèle théorique de rétrodiffusion des rizières du site de Jatisari.....	69
Tableau 10 : Détail des confusions entre les différentes classes d'occupation du sol.....	100
Tableau 11 : Correspondance entre les hauteurs mesurées sur le terrain, les hauteurs estimées et le résultat de la carte des classes de hauteur au site de Semarang.....	106
Tableau 12 : Durées des différentes phases phénologiques pour des cultures ayant des cycles de croissance différents.....	121
Tableau 13 : Paramètres d'entrée pour la validation du modèle.....	124
Tableau 14 : Informations (date de semis et biomasse sèche) dérivées des données RADARSAT au site de Jatisari.....	130
Tableau 15 : Informations (date de semis et biomasse sèche) dérivées des données ERS au site de Semarang.....	130
Tableau 16 : Impact de l'incertitude sur l'extraction du coefficient de rétrodiffusion σ° sur l'estimation des rendements. Comparaison entre les rendements mesurés ou simulés avec les données de terrain et les rendements déduits des σ° , σ°_{min} et σ°_{max}	136

UTILISATION DES DONNEES RADAR POUR LE SUIVI DES RIZIERES : CARTOGRAPHIE, SUIVI DE CROISSANCE ET ESTIMATION DU RENDEMENT

Le suivi des écosystèmes rizicoles inondés reste d'une importance majeure à la fois en terme de production, à l'échelle du champ, d'une région ou d'un pays, et en terme d'émission de méthane à une échelle régionale ou globale. La majeure partie des rizières étant regroupées en Asie, où la forte couverture nuageuse limite l'acquisition de données optiques, les données radar apparaissent comme un outil à fort potentiel pour la gestion de ces écosystèmes.

L'objectif de ces travaux consiste à déterminer la capacité des données des satellites radar pour l'identification et le suivi des zones de cultures de riz, ainsi que pour la prévision des rendements, et d'une manière plus prospective, l'estimation de l'émission de méthane.

L'approche comprend 3 parties :

Une description des caractéristiques des écosystèmes rizicoles irrigués ou inondés dans le monde, ainsi que l'étude du développement de la plante au cours du cycle de croissance.

Une étude expérimentale comprenant l'analyse et la synthèse de l'évolution des différents paramètres de la plante, mesurés sur des sites géographiques où les conditions de croissance sont très différentes, ainsi que l'analyse du coefficient de rétrodiffusion des rizières extrait des données de plusieurs capteurs radar (ERS, RADARSAT, JERS), en fonction de certains de ces paramètres (âge, hauteur, biomasse). Ces résultats expérimentaux ont été expliqués physiquement et quantifiés par un modèle théorique de rétrodiffusion des rizières.

Enfin, une troisième partie regroupe les différentes applications qu'il a été possible de développer pour répondre aux besoins de suivi des rizières. Ces applications sont basées sur les résultats de l'analyse expérimentale et ont pour objectif d'être indépendantes du site ou du type de rizière auquel elles s'appliquent. Il s'agit 1) d'une méthode d'estimation des surfaces rizicoles, basée sur le changement temporel remarquable de la rétrodiffusion des rizières, 2) d'une méthode de suivi de croissance et d'estimation du nombre de récoltes par an, basée sur l'inversion des relations entre le σ^0 des données ERS et la hauteur des plantes en cartes de classes de hauteur, 3) d'une méthode de prévision des rendements rizicoles, basée sur le couplage entre les données radar et un modèle de production du riz, 4) enfin, une réflexion prospective sur l'estimation de l'émission de méthane par les rizières a permis de proposer des axes de recherche pour atteindre cet objectif.

Mots clés : Riz, télédétection radar, modèle de rétrodiffusion, cartographie, suivi de croissance, modèle de croissance, rendement, méthane.