

Mémoire de DEA. Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental ; Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts - Université Montpellier II.

Compréhension des stratégies d'adaptation à la variabilité des pluies en riziculture inondée par la modélisation

Cas du bassin versant de la Lam Dom Yaï, région Nord-est de la Thaïlande.

Guillaume Lacombe

Sous la direction scientifique de : Michel Desbordes, Université Montpellier II
Claude Millier, ENGREF

Avec l'encadrement de : François Bousquet, CIRAD
Marcel Kuper, CIRAD
Guy Trébuil, CIRAD

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD)
Département Territoires, Environnement et acteurs (CIRAD-TERA)
Montpellier – France.

Institut international de recherche sur le riz (IRRI)
Social Sciences Division
Los Banos, Philippines

Université d'Ubon Ratchathani
Faculté d'agriculture
Thaïlande

JUIN 2003

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement François Bousquet et Guy Trébuil qui m'ont encadré pendant la période de stage passée en Thaïlande ainsi que Marcel Kuper qui m'encadrerait à Montpellier.

A François Bousquet, pour m'avoir accueilli dans les meilleures conditions au sein de son projet, après que j'en ai exprimé le souhait, puis guidé et conseillé au cours des phases de conceptualisation et de modélisation, enfin pour les bases de programmation sous Cormas qu'il m'a données.

A Marcel Kuper, pour ses conseils concernant la préparation de la phase terrain, pour les choix de représentation des processus hydrologiques dans le modèle et enfin pour les précieuses indications qui m'ont aidées à préparer la soutenance de ce mémoire.

A Guy Trébuil, pour m'avoir fait partager ses vastes connaissances sur les systèmes agraires de Thaïlande, pour l'aide qu'il m'a fournie, à chaque étape de mon travail, tant sur le plan méthodologique que sur les idées concernant la forme et le fond de ce travail.

Un grand merci à Warong Naivinit et Surajit Phupak pour les discussions en cours de recherches, échanges très instructifs pour la prise de recul nécessaire à la progression dans nos travaux respectifs. Merci également au M. Prakrop Virojkut, président de l'université d'Ubon Ratchathani, qui a mis à ma disposition toutes les facilités pour que je puisse réaliser mon travail de terrain dans les meilleures conditions. Mes sincères remerciements à Khun Chaliaw qui m'a guidé et servi d'interprète au cours des enquêtes.

Enfin, tous mes remerciements aux enseignants du DEA « Sciences de l'eau dans l'environnement continental » qui m'ont transmis très efficacement les connaissances théoriques nécessaires à la réalisation du stage.

SOMMAIRE

Introduction	4
Contexte du travail de recherche	4
Problématique	6
Organisation du travail et du rapport	7
I. Connaissances disponibles sur la région Nord-est de la Thaïlande.	9
I-1. L'environnement bio-physique	9
I-1-1. Géomorphologie, géologie et sols	9
I-1-2. Les ressources en eau	10
I-1-2-1 Climat et variabilité des pluies	10
I-1-2-2. Les eaux de surface	12
I-1-2-3. Les eaux souterraines	13
I-2. Socio – économie et usages de l'eau	13
I-2-1. Démographie et économie	13
I-2-2. L'agriculture	13
I-2-3. Les usages agricoles de l'eau.	14
I-2-3-1. Quelle solution pour éradiquer le problème des sécheresses ?	14
I-2-3-2. L'arrivée des bassins, une nouvelle solution ?	15
I-2-4. Les usages domestiques de l'eau.	16
I-3. La modélisation, outil d'intégration des connaissances.	16
I-3-1. Les modèles de bilan hydrique en riziculture inondée développés pour le nord-est de la Thaïlande.	16
I-3-2. Choix d'un modèle pour représenter l'interaction ressource - usages de l'eau.	18
II. Investigations et analyses pour une meilleure connaissance de la zone étudiée.	19
II-1. Délimitation de la zone d'étude	19
II-2. Analyse de la pluviométrie	21
II-2-1. Analyse de la variabilité temporelle de la pluviométrie.	22
II-2-2. Analyse de la variabilité spatiale de la pluviométrie.	23

III. Compréhension des usages de l'eau par enquêtes en milieu paysan	26
III-1. Préparation des enquêtes	26
III-2. Résultats	27
III-2-1. La préparation des pépinières de riz.	29
III-2-2. Le repiquage	31
III-2-3. Le maraîchage de contre-saison	34
IV. Intégration des connaissances par la modélisation.	36
IV-1. Conceptualisation d'un modèle	36
IV-1-1. Les objectifs du modèle	36
IV-1-2. L'espace et le temps dans le modèle	36
IV-1-3. Structure et fonctionnement du modèle	37
IV-1-3-1. La couche nappe et rivière	39
IV-1-3-2. La couche parcelles et bassins	41
IV-1-4. Prise en compte de la variabilité spatiale des sols	45
IV-1-4-1. La modélisation : un processus d'accompagnement de la recherche	46
IV-1-4-2. A la recherche des données manquantes	46
IV-1-4-3. Observation de terrain et reconsidérations des valeurs calculées pour les conductivités hydrauliques des sols	48
IV-1-5. Les variables de forçages	50
IV-1-5-1. Les précipitations	50
IV-1-5-2. L'évapotranspiration	50
IV-1-6. Des fonctions « irrigation de complément » et « Evaluation du déficit hydrique » pour la représentation des usages.	51
IV-2. Implémentation du modèle	52
IV-2-1. Diagramme UML du modèle	52
IV-2-2. Cormas	54
IV-2-3. Spatialisation des agents du modèle	55
IV-2-4. Vérification du modèle	58
IV-2-4-1. Fonctionnement des parcelles	58
IV-2-4-2. Fonctionnement des bassins	67
IV-2-4-3. Fonctionnement des nappes et rivières	69
IV-2-4-4. Vérification des fonctions« irrigation de complément » et « Evaluation du déficit hydrique »	71
IV-2-5. Calibration du modèle	74
IV-2-5-1. Les variations du niveau de la nappe	74
IV-2-5-2. Les variations de l'humidité de la zone racinaire	75
IV-2-5-3. Les variations du niveau d'eau dans les casiers rizicoles	76
IV-2-5-4. Les variations du niveau d'eau dans les bassins	78

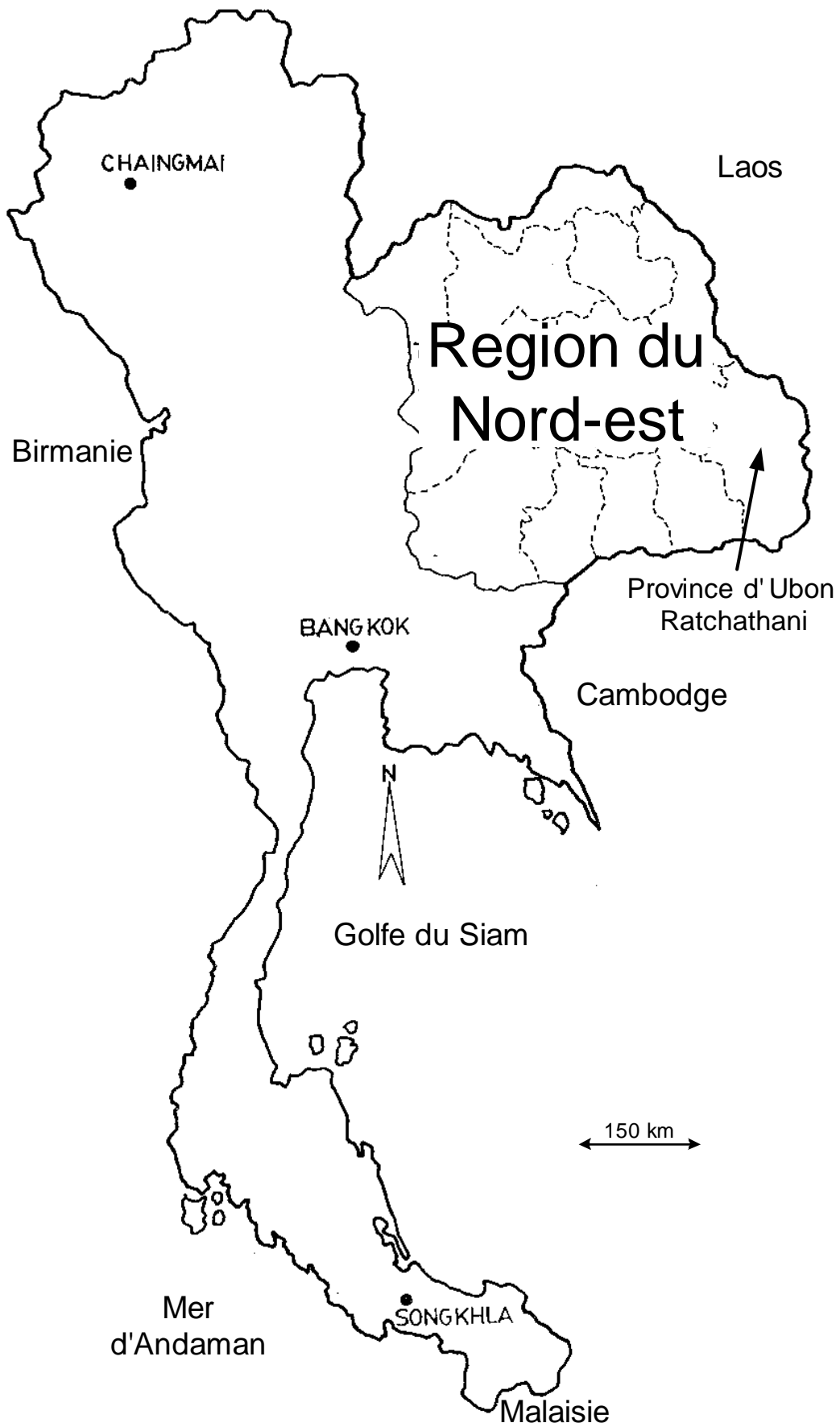
IV-2-5-5. Le débit de la rivière	79
IV-3. Les scénarios	80
IV-3-1. Objectifs de la simulation	80
IV-3-2. Résultats d'une première simulation	81
IV-3-2-1 Protocole expérimental	81
IV-3-2-2 Résultats	82
IV-3-2-3 Interprétations et discussions	83
IV-3-3 Perspectives.	84
Conclusions	85
BIBLIOGRAPHIE	86
ANNEXES	92
Annexes I. Classification des projets d'irrigation	92
Annexes II. Analyse de la variabilité des pluies par analyse en composantes principales normées (ACP)	92
II-1 ACP normée sur les hauteurs pluviométriques annuelles	92
II-2. ACP normée sur les hauteurs pluviométriques mensuelles	94
Annexes III. Questionnaire pour la première phase d'enquêtes réalisée en mars 2003	97
Annexes IV. Données sur les sols	98
Annexes V. Expérimentations sur la compaction des sols	101

Introduction

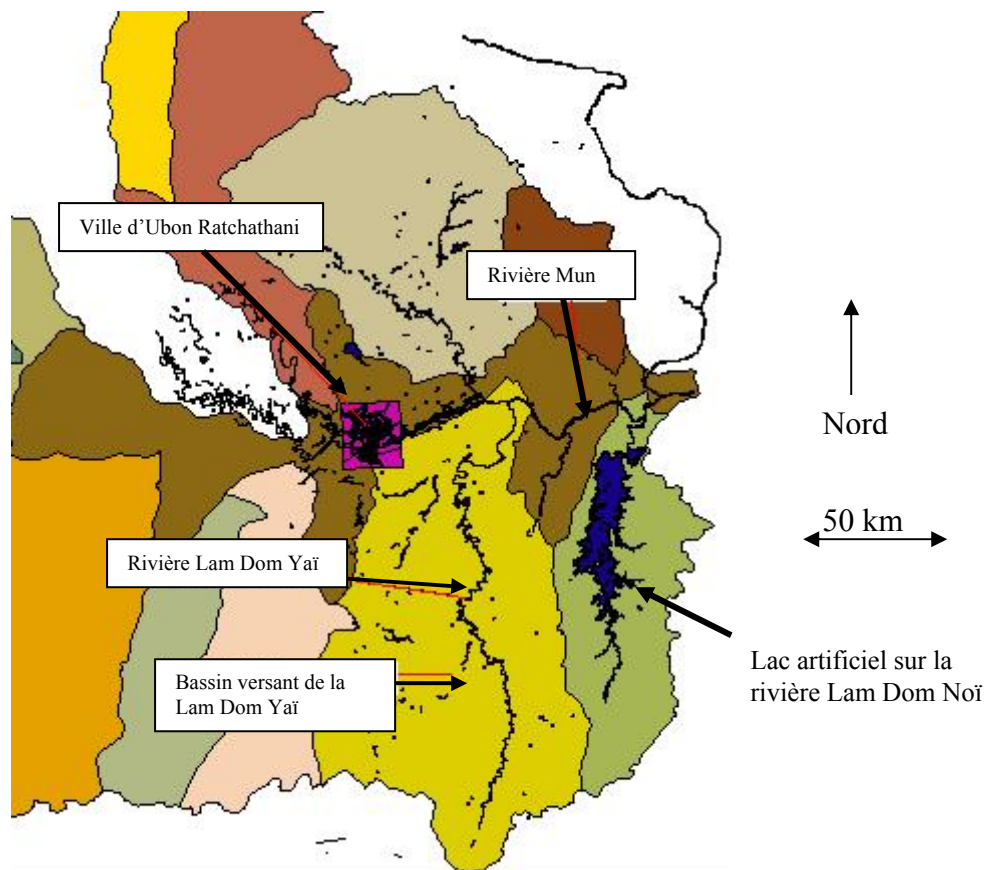
Contexte du travail de recherche

Dans le cadre de sa coopération avec l'Institut international de recherche sur le riz (IRRI), le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) conduit des activités sur la gestion des ressources naturelles et la co-viabilité des dynamiques naturelles et sociales en Asie du Sud-Est. L'un des projets initié récemment, en collaboration avec la Faculté d'agriculture de l'Université d'Ubon Ratchathani (UBU), concerne l'utilisation de l'eau dans la région Nord-est de la Thaïlande. MM Surajit Phupak et Warong Naivinit, tous deux enseignants à la Faculté d'agriculture, ont décidé de renforcer cette collaboration en partageant leurs connaissances et résultats de recherche avec les miens, pendant mon stage de DEA. Des discussions avec Warong Naivinit avaient permis de préparer ce stage à l'occasion de son séjour au CIRAD en septembre-octobre 2002. M. Surajit Phupak effectue actuellement des travaux dans le cadre d'une thèse de doctorat, avec l'IRRI et l'Université de Wageningen, sur la gestion du risque lié à la disponibilité en eau pour la riziculture inondée. Son terrain d'étude se situe au sud de la province d'Ubon Ratchathani (Carte 1), dans le bassin versant de la rivière Lam Dom Yaï (Carte 2). M. Warong Naivinit s'apprête lui aussi à commencer des études doctorales sur un autre thème en gestion intégrée des ressources renouvelables avec l'utilisation des systèmes multi-agents (SMA) et des systèmes d'information géographique (SIG).

Pendant la phase « terrain » de mon stage de DEA, j'ai eu la chance de pouvoir séjourner sur le campus universitaire d'Ubon Ratchathani. La Faculté d'agriculture a mis à ma disposition toutes les facilités nécessaires à la conduite de ce travail dans de bonnes conditions. Les recherches, effectuées en collaboration étroite avec nos partenaires thaïlandais, ont contribué à renforcer les liens établis entre les projets IRRI-CIRAD et UBU.



Carte 1. Thaïlande



Carte 2 : Bassins versants de la partie méridionale de la région nord-est de la Thaïlande

Problématique

La Thaïlande, pays qui a basculé vers une économie de marché entre les années 1986 et 1996, présente aujourd'hui une grande hétérogénéité dans la répartition régionale de ses richesses. Alors que l'axe nord-sud du pays s'est développé à vive allure grâce au tourisme et à son industrialisation (exportation de textiles, matériel électronique, produits agro-alimentaires), le nord-est du pays, « l'Isarn » économiquement excentré, peuplé par des laos et des khmers, apparaît comme une région largement en retard par rapport au reste du pays. Ce retard s'explique également par les conditions pédo-climatiques très désavantageuses qui affectent la production agricole : une forte variabilité inter-mensuelle et inter-annuelle des précipitations associée à des sols à texture grossière sur grès limitent largement le potentiel productif des terres (Limpinuntana, 2001).

La riziculture inondée avec faible maîtrise de l'eau joue encore un rôle essentiel dans les petites exploitations familiales de quelques hectares, notamment dans la bande méridionale de la région où j'ai travaillé. Les travaux de recherche antérieurs, destinés à lutter contre la pauvreté de cette région, se sont surtout focalisés sur l'amélioration des faibles rendements rizicoles des cultivars (de l'ordre de 1,8 tonnes de paddy par hectare) et l'amélioration de leur résistance aux déficits hydriques temporaires en phase végétative ou à la floraison (Somrith, 1997 ; ACIAR, 1997). La faiblesse de la production physique à l'unité de surface est ici en partie compensée par la culture de mai à novembre de variétés de riz à la qualité du grain exceptionnelle :

grain long et fin, glutineux (pour l'autoconsommation) ou non (le fameux KDML 105 à « parfum de jasmin ». Depuis une dizaine d'années seulement, quelques projets internationaux (de l'ACIAR australien, de l'IRRI, du JIRCAS japonais notamment) se sont intéressés à l'étude des relations climat – sol - population rizicoles dans les conditions locales, le plus souvent en testant de nouvelles technologies devant améliorer l'hydrologie de surface des casiers rizicoles. Pour l'instant, leur impact reste très limité, tandis que les agriculteurs ont développé au fil des décennies des pratiques agricoles anti-aléatoires destinées à limiter les effets néfastes des variations de la pluviométrie.

Le travail effectué à l'occasion de ce stage de DEA a pour objectif de comprendre les mécanismes d'adaptation des agriculteurs à la variabilité au moyen d'une analyse-diagnostic de la situation locale :

- caractérisant la variabilité climatique,
- comprenant les règles de décision des agriculteurs pour l'utilisation de l'eau,
- intégrant ces connaissances au cours d'un processus de formalisation – modélisation – simulation pour évaluer les mécanismes d'adaptation des usages de l'eau.

Organisation du travail et du rapport :

La partie méridionale de la région Nord-Est de la Thaïlande, où se situe la province d'Ubon Ratchathani, a longtemps été délaissée par la recherche scientifique, au profit de la province de Khon Kaen, capitale du Nord-est septentrional, où se sont focalisées la plupart des activités de recherche régionales jusqu'à la fin des années quatre vingt. En conséquence, peu de données secondaires et facilement disponibles existent sur la province d'Ubon Ratchathani.

Un premier travail d'investigation et de collecte d'informations utiles pour cette étude a donc été mené auprès des partenaires de la Faculté d'agriculture d'UBU et des services gouvernementaux appropriés. Après cette première phase, une zone d'étude a été délimitée, en fonction de sa pertinence pour traiter la question posée, en fonction des informations existantes et de sa facilité d'accès.

La seconde phase du travail a consisté à réaliser des enquêtes en milieu paysan afin de compléter les connaissances déjà disponibles.

La conceptualisation d'un premier modèle a permis d'organiser les connaissances préalablement collectées, d'en juger la crédibilité compte tenu des objectifs du travail, ainsi que d'identifier les principales lacunes à combler.

Un retour sur le terrain au tout début du cycle rizicole annuel en avril-mai a permis d'approfondir les questions jugées importantes au moyen d'un second cycle d'enquêtes auprès des agriculteurs et de compléter les données nécessaires pour la construction du modèle. Cette seconde phase « terrain » achevée, la conceptualisation du modèle a pu être finalisée. Après son implémentation, en fin de stage, le modèle a

permis de conduire quelques simulations illustrant ses potentialités pour la recherche sur les interactions ressources – usages de l'eau dans le type d'agro-écosystème étudié.

La structure de ce rapport suit ce même fil conducteur temporel, révélant ainsi la logique du cheminement suivi et justifiant les décisions prises au cours du processus de recherche.

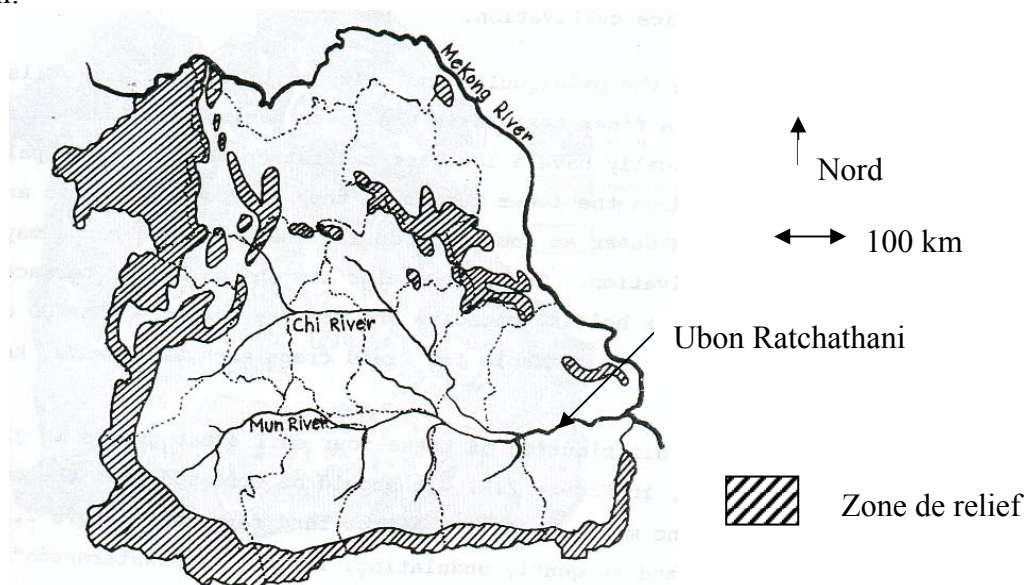
I. Connaissances disponibles sur la région Nord-est de la Thaïlande

I-1. L'environnement biophysique

Le Nord-est est l'une des cinq grandes régions administratives de la Thaïlande. Elle occupe 168.854 km² soit le tiers du pays.

I-1-1. Géomorphologie, géologie et sols

Cette région est formée d'un large plateau, dénommé plateau de Korat. Ses limites correspondent à des frontières naturelles : au sud et à l'ouest, des marges escarpées correspondant aux chaînes montagneuses de Dongrek et Petchabun la sépare du Cambodge et de la plaine centrale de la Thaïlande. Elle se délimite au nord et à l'est par le fleuve Mékong marquant la frontière avec le Laos. A l'exception de ses marges abruptes, une seule proéminence vient rompre le paysage : il s'agit de la chaîne montagneuse de Phu Phan qui divise, dans un axe nord-ouest sud-est, le plateau en 2 bassins : celui de Korat au sud et de Sakhon Nakhon au nord. En raison de sa structure géologique formée d'une succession de couches sédimentaires horizontales, son relief est peu marqué : 72% des surfaces sont comprises entre 101 et 200 mètres d'altitude, les 28 % restant entre 201 et 500 mètres. (Donner, 1978). Le paysage se présente comme une succession de plaines inondables et de plateaux, ondulants d'ouest en est. Le bassin de Korat couvrant 33.000 km², est drainé par les deux principales rivières de la région : la Mun et la Chi. La rivière Chi se déverse dans la rivière Mun à hauteur de la ville d'Ubon Ratchathani et le Mun se jette 100 km à l'est dans le Mékong. Le bassin de Sakhon Nakhon, couvrant 10.000 km², est drainé de nombreux cours d'eau se déversant directement dans le Mékong. A quelques kilomètres de sa jonction avec le fleuve Mékong, la rivière Mun comporte une série de rapides jouant un rôle important dans le relief : ils imposent un niveau de base aux phénomènes d'érosion et contrôlent le très faible gradient des rivières Mun et Chi.



Carte 3. Les trois principaux cours d'eau et zones de relief du nord-est de la Thaïlande

Le paysage actuel résulte de la succession de deux périodes d'érosion : une première, à l'ère tertiaire, au cours de laquelle le socle rocheux est altéré et sculpté par l'érosion, donnant au paysage sa forme ondulante actuelle. Au début du quaternaire, un abaissement du niveau de base provoque le creusement de vallées à 150 mètres en dessous du niveau actuel. Il est finalement suivi d'une importante période de sédimentation comblant les canyons et aboutissant aux grandes plaines actuelles. Au Pléistocène, un abaissement du niveau de la mer provoque une aridification de la région. La disparition de la végétation favorise alors l'accumulation de sédiments sableux dans les principales rivières aboutissant à la formation des plaines inondables actuelles. (Mongkolsawat, 1995).

Les sols du nord-est de la Thaïlande dérivent généralement de trois grands groupes : alluvions d'origine gréseuse, colluvions d'origine gréseuse, résidus gréseux et basaltique de la roche mère (Moncharoen *et al* 1987, Panichapong 1988). Ils sont en majorité à texture grossière et présentent une très faible teneur en potassium, calcium, magnésium et phosphore. (Ragland et Boonpuckdee, 1988). L'effet combiné de la déforestation, qui fut très importante dans cette région durant les décennies soixante dix et quatre vingt, et du lessivage par les pluies n'a fait qu'accroître la teneur en sable de ces sols d'origine gréseuse. Les teneurs en argile et en matière organique sont donc faibles. Dominée par la kaolinite, la composante argileuse confère aux sols un caractère acide et une faible capacité d'échange cationique. Il en résulte des sols à très faible cohésion structurale, faible pouvoir de rétention de l'eau, et souvent sujets aux problèmes de salinité, toxicité ferreuse, et d'érosion (Yuvaniyama, 2001).

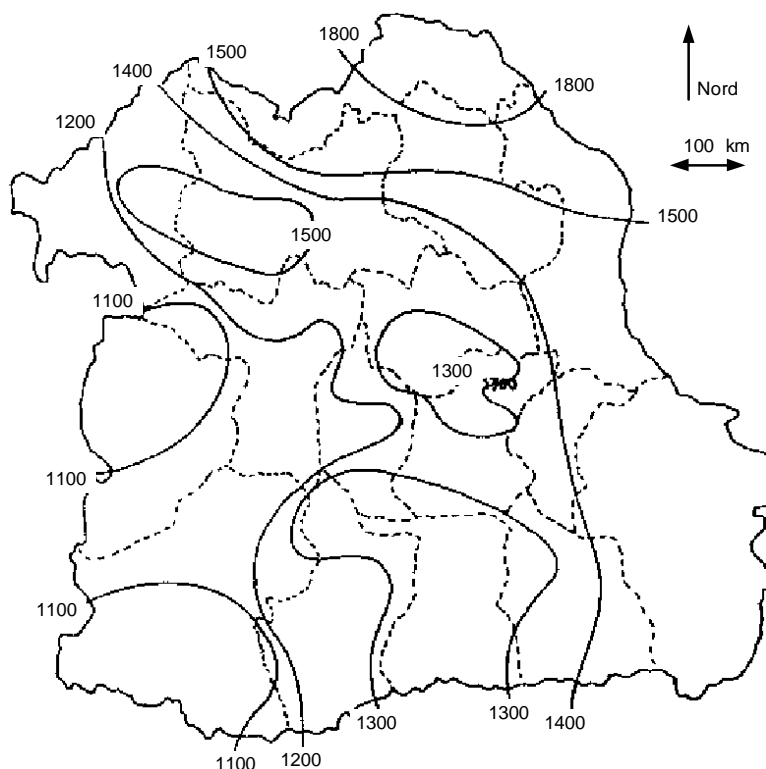
La plupart des études réalisées sur les sols du nord-est de la Thaïlande aboutissent généralement aux mêmes conclusions. Les auteurs évoquent les principales caractéristiques du sol (sableux, à faible pouvoir de rétention en eau, carencés en ions majeurs) pour expliquer les faibles rendements agricoles (Tomar, 1996). Oberthür et Kam (2000) démontrent que ces paramètres étudiés jusqu'à présent à l'échelle régionale peuvent varier considérablement à l'échelle de petits bassins (40 ha en moyenne) et sont souvent en partie responsables de fortes variations de la productivité agricole sur de faibles distances. Cette étude est particulièrement intéressante car, non seulement elle remet en cause les résultats admis jusqu'à présent, mais elle constitue l'une des premières recherches réalisées dans le bassin versant de la rivière Lam Dom Yaï que nous avons choisi comme terrain d'étude.

I-1-2. Les ressources en eau

I-1-2-1 Climat et variabilité des pluies

D'après la classification de Koppen (Griffiths, 1978), le climat du nord-est de la Thaïlande correspond au type « savane tropicale », avec trois saisons distinctes : la saison des pluies ou saison humide, « l'hiver » ou saison froide et « l'été ». Ces trois saisons sont influencées par les moussons du sud-ouest (humide de mai à octobre) et du nord-est (sèche de novembre à avril).

La saison des pluies s'étend de mai à octobre. La distribution annuelle des pluies est bimodale avec un premier pic correspondant à la période mai-juin et un second pic de juillet à octobre. Le premier pic de précipitations est apporté par la mousson du sud-ouest alors que le second résulte d'une interaction entre mousson du sud-ouest et pluies cycloniques originaires de la mer de Chine. Les hauteurs pluviométriques sont généralement beaucoup plus importantes lors du second pic. Les pluies cycloniques surviennent généralement 3 à 4 fois par an et déterminent bien souvent les variations des hauteurs de pluie inter-annuelles. Elles peuvent occasionner des inondations, en général au mois de septembre, souvent dévastatrices dans les bas-fonds et le long des fleuves principaux. Trois zones peuvent être distinguées en fonction des hauteurs annuelles moyennes des pluies : la partie Est (où se situe la province d'Ubon Ratchathani) et Nord de la région reçoit plus de 1400 mm de pluie par an. L'ouest de la région bénéficie des pluies les plus faibles avec des hauteurs ne dépassant pas 1200 mm. La partie centrale de la région, comprise entre les deux premières zones, reçoit des hauteurs s'échelonnant entre 1200 et 1400 m (Carte 4).



Carte 4. Isohyètes dans la région du nord-est de la Thaïlande (mm/année)

La saison fraîche correspond à la période entre les mois de novembre et février. Cette période se caractérise par des températures relativement basses et un air sec apportés par la mousson du nord-est. L'humidité relative est comprise entre 58 et 70%. Les températures moyennes journalières varient entre 22 et 25 degrés.

La saison sèche s'étend de mars à la mi-mai. L'air est sec et chaud avec quelques rares averses. L'humidité est généralement comprise entre 62 et 71%. La température augmente progressivement jusqu'à atteindre un pic à la mi-avril. Les températures moyennes journalières sont comprises entre 28 et 30 degrés avec des maxima dépassant 45 degrés. Ensuite, les pluies augmentent en fréquence et en intensité à l'installation de la mousson du sud-ouest (Vorasoat, 1985).

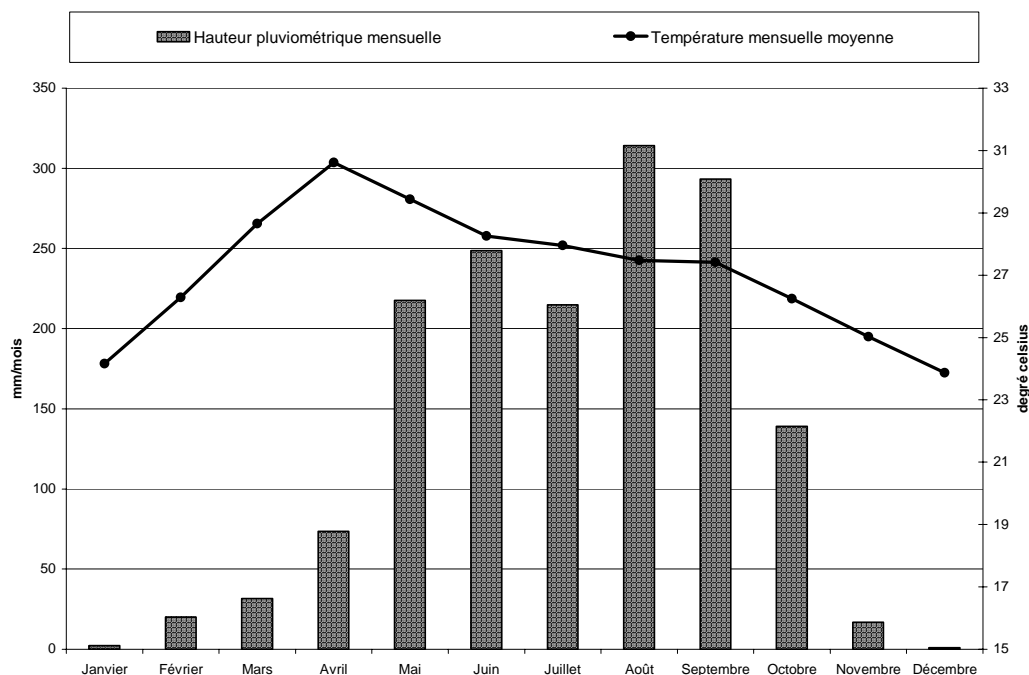


Figure 1. Distribution des températures et précipitations moyennes mensuelles à la station météorologique d'Ubon Ratchathani (1951-2003). Source : Meteorological Department Bangkok, Thailand.

Plusieurs écrits scientifiques relatent la variabilité pluviométrique au nord-est de la Thaïlande : après avoir démontré que l'agriculture pluviale de la région est particulièrement sensible à la distribution des pluies au pas de temps journalier, Saenjan (Saenjan *et al.* 1992) analyse la distribution des jours avec et sans pluie dans le temps et l'espace. Il conclut à l'imprévisibilité et l'inégale distribution des précipitations pendant la saison des pluies, directement liées au nombre de jours sans pluie qui augmente d'Est en Ouest.

Dans son article « Homogeneity and Heterogeneity : An analysis of the Nature of Variation in Northeastern Thailand », Rigg (Rigg, 1991), décrit la pluie comme la principale source de variabilité temporelle dans la région : une variabilité entre les années bien représentée par la très grande disparité des hauteurs pluviométriques observées pour des mois ou décades identiques entre plusieurs années. La variabilité des pluies est fréquemment évoquée comme étant la première cause des faibles rendements de la production rizicole jugée responsable de la pauvreté de la région (Fukui, 1993 ; Widawsky, 1990).

I-1-2-2. Les eaux de surface

La région du nord-est de la Thaïlande peut se diviser en trois bassins principaux : les bassins du fleuve Mékong, des rivières Chi et Mun couvrant respectivement des surfaces de 12.700 km², 49.480 km² et 65.520 km². Les ressources principales sont les eaux de pluie et l'écoulement des rivières. Le débit de base des deux principales rivières de la région, fortement corrélé à la pluviosité et présentant des variations en pics, traduit la faible capacité des sols à retenir l'eau, accentuée par la déforestation du nord-est de la Thaïlande.

I-1-2-3. Les eaux souterraines

Des aquifères, poreux et fissurés, sont présents sur l'ensemble de la région, principalement dans la couche sédimentaire (Srisuk *et al.*, 2001). Ils sont composés majoritairement de grès et de limon peu perméables : environ 5.10^{-4} cm/sec (JICA, 1992). Ils sont généralement exploités par des forages de profondeur comprise entre 15 et 80 mètres. Du fait de la faible perméabilité du sous-sol, les rendements ne dépassent généralement pas les 2 m³/h (Patamatamkul, 2001).

I-2. Socio – économie et usages de l'eau

I-2-1. Démographie et économie

La région du nord-est compte environ 20 millions d'habitants, soit le tiers de la population nationale. Cette région est la plus pauvre du pays : en 1998, 23,1% de ses habitants vivaient en-dessous du seuil de pauvreté, contre 7,7% pour la région Centre et 0,5% pour l'agglomération de Bangkok (Prapertchob, 2001). Parmi les cinq grandes régions qui composent la Thaïlande, celle du nord-est compte la plus grande surface agricole (9,25 millions d'hectares) et le plus grand nombre d'exploitations agricoles (2.273.000). 80% de la population vit de l'agriculture (Center for Agricultural Information, 1998).

I-2-2. L'agriculture

La riziculture, très majoritairement non irriguée, représente 80% des surfaces cultivées du nord-est. Parmi les 20% restant, 90% sont cultivés en manioc, canne à sucre, kénaf et arachide. Le reste est occupé par des cultures fruitières et maraîchères. Les plus grandes proportions de terres rizicoles se situent dans les parties est et sud-est de la région nord-est, dans et à proximité des grandes plaines alluviales du Mékong, du Chi et du Mun (KKU-Ford Cropping Systems Project, 1982).

La riziculture pratiquée est de type inondée, à un seul cycle par an. Cette culture est soumise au régime des pluies, avec théoriquement un début de cycle sur terrain non inondé suivi par une inondation plus ou moins profonde des casiers parallèlement à l'intensification des pluies et à la montée des eaux (crues, nappe) inondant les rizières. Le riz est récolté en octobre (variétés précoces en rizières hautes) après la décrue. Les parcelles sont généralement endiguées pour limiter le ruissellement, pour pratiquer des transferts par gravité de casiers en casiers, pour tenter de maintenir une lame d'eau superficielle assurant une humidité suffisante pour les racines et limiter la croissance des adventices idéalement jusqu'après la floraison. Le semis direct ou semis en pépinières suivi d'un repiquage sont pratiqués dans la région. Le semis direct, moins sensible au stress hydrique (graines non pré germées), est plus commun dans la partie nord-ouest de la région (province de Khon Kaen) où les hauteurs pluviométriques sont plus faibles.

Le riz inondé représente 40 millions d'hectares à travers le monde, soit 28% des surfaces rizicoles globales, dont 5 à 6 millions d'hectares pour la seule région du nord-est de la Thaïlande. Il fournit 18% de la production mondiale de riz (Mackill *et al.* 1996). Plus de 90% des surfaces de riz inondé se trouvent en Asie. En Thaïlande, 75% des rizières sont de type inondé et se situent, pour 95% d'entre elles dans la région nord-est du pays où elles produisent un riz destiné principalement à l'autoconsommation, mais aussi exporté car recherché sur le marché mondial (riz long à parfum de jasmin). C'est aussi l'écosystème rizicole dominant au Cambodge, au Laos et en Birmanie.

La succession et l'imprévisibilité des périodes de déficit hydrique et la présence fréquente de sols sableux et acides sont les principales contraintes rencontrées en riziculture inondée dans le nord-est de la Thaïlande (Trébuil *et al.* 2000). Ces conditions pédoclimatiques particulièrement défavorables sont souvent évoquées comme étant la principale cause des faibles rendements en riz de la région et de sa pauvreté économique. Les rendements moyens en paddy sont de l'ordre de 1,75 t/ha, par rapport aux 4,9 t/ha obtenus dans les régions irriguées (B. Somrith, 1997).

I-2-3. Les usages agricoles de l'eau.

I-2-3-1. Quelle solution pour éradiquer le problème des sécheresses ?

A partir de 1939, des grands projets d'irrigation furent entrepris par le Département royal d'irrigation (RID), la Compagnie générale d'électricité de Thaïlande (EGAT), le Département pour le développement et la promotion de l'énergie (EDPD) et d'autres agences gouvernementales. Ces aménagements construits (barrages avec canaux d'irrigation), sont généralement classés en fonction de leur taille (Annexes I) : dix projets à grande échelle ont été construits dans le bassin de Korat. Ils représentent au total une capacité de stockage de plus de 7000 millions de mètres cube d'eau et une aire irriguée de 207.560 hectares. Ils sont gérés par le gouvernement et le paysan n'intervient qu'au niveau du canal tertiaire. 180 projets à moyenne échelle totalisent un volume stocké de 1295 millions de mètres cube et couvrent une surface de 177.400 ha. Ils sont normalement gérés par des paysans regroupés en « associations d'utilisateurs de l'eau » assistées par les agences propriétaires.

Tous ces aménagements permettraient théoriquement de couvrir 7% des surfaces cultivées. Ils sont souvent abandonnés ou mal entretenus : les périmètres irrigués ne sont exploités aujourd'hui que sur 15% de leurs surfaces. (Wigzell, 1995). Cette sous-exploitation s'explique aujourd'hui par une non appropriation de la part des agriculteurs et une inadaptation des moyens fournis aux besoins réels (KKU-Ford Cropping Systems Project, 1982). Ces grands projets ont été construits trop rapidement et les paysans n'ont pas été impliqués à toutes les étapes de développement des projets. Les associations d'utilisateurs de l'eau ont été formées sans tenir compte des organisations et hiérarchies locales. Bien souvent, le gouvernement s'est chargé de la construction des aménagements de tête sans prévoir de dispositif de distribution (Patamatamkul, 2001).

Dans cet environnement écologique incertain, les paysans se sont adaptés en développant un système de production rizicole minimisant le risque. En particulier, les principales variétés cultivées sont à faible rendement mais photopériodiques¹ et plus tolérantes à la sécheresse. Avec une productivité faible mais relativement stable, les paysans assurent leur autosubsistance et vendent leurs surplus rizicoles.

I-2-3-2. L'arrivée des bassins, une nouvelle solution ?



Photographie 1 : Bassin près du village Ban Sok Saeng.
22 avril 2003.

Depuis une quinzaine d'années, un nouveau système de stockage de l'eau semble se développer avec succès : de nombreux petits bassins sont creusés au niveau de la ferme. Ces bassins sont apparus dans les années 1990, dans le cadre d'une campagne nationale de promotion de l'agriculture intégrée lancée et soutenue par le Roi. Ils devaient permettre de diversifier les productions au niveau de l'exploitation : pisciculture, maraîchage de contre saison, et de se prémunir contre les risques de sécheresse précoce au moyen de l'irrigation d'appoint pour le riz (Bhuiyan *et al.* 1994). Plus de 65.000 bassins furent creusés entre 1994 et 1996, financés par le gouvernement (Hungspreug, 2000).

En riziculture, les bassins sont le plus souvent utilisés au moment du semis des pépinières, entre fin avril et la mi-mai : ils permettent une irrigation d'appoint pour la préparation des casiers rizicoles complétant ainsi les apports pluviaux encore faibles à cette époque de l'année. Ils peuvent être également utilisés au moment du repiquage, si les sols sont trop secs et compacts. Des maraîchers et vergers sont généralement cultivés autour du bassin pendant la saison sèche.

¹ Variété dont la période de floraison est déterminée par le raccourcissement de la durée des jours fin octobre, début novembre.

Les bassins servent également à l'élevage piscicole. Les poissons sont généralement consommés en fin de saison sèche, lorsque l'eau atteint son niveau le plus faible. Enfin, ils facilitent l'abreuvement des animaux d'élevage (buffles, bovins, volaille) spécialement pendant la saison sèche quand les autres points d'eau se tarissent.

I-2-4. Les usages domestiques de l'eau.

Dans les villages isolés, les besoins domestiques sont généralement satisfaits par l'eau de pluie pendant la saison humide (conservée dans de grandes jarres) ou l'eau du sous-sol pompée au niveau de puits individuels de profondeur moyenne égale à 20 mètres. Leur très faible rendement (2 m³/heure) ne leur réserve qu'un usage domestique. Depuis quelques années, avec l'électrification des villages et le développement de nouvelles technologies de forage, des puits à plus large diamètre sont creusés. Grâce à leur fort rendement (plus de 50m³/heure), ils peuvent subvenir aux besoins de tout ou partie des villages via un réseau de distribution. Avec l'intensification de l'exploitation des réserves en eau du sous-sol se pose la question de l'estimation des stocks d'eau potable disponibles et de leur pérennité (Srisuk, 2001).

I-3. La modélisation, outil d'intégration des connaissances.

I-3-1. Les modèles de bilan hydrique en riziculture inondée développés pour le nord-est de la Thaïlande.

Avant d'entamer la conceptualisation de notre modèle, un état de l'art des modèles préexistants peut s'avérer utile.

Plusieurs modèles ont été conçus pour représenter et comprendre le fonctionnement biophysique de la riziculture inondée. Fukai *et al.* (2000) expliquent qu'il est difficile d'améliorer les variétés de riz si l'on connaît mal les interactions entre environnement, génotype et rendement. La comparaison des performances de plusieurs variétés est généralement biaisée par des conditions environnementales différentes. Le modèle RL Rice (« Rainfed Lowland Rice ») simule la croissance de différentes variétés en fonction de la quantité d'eau disponible, calculée par un bilan hydrique. En modifiant les paramètres du bilan hydrique (percolation, infiltration, évapotranspiration, écoulement hypodermique), Fukai *et al.* analysent la sensibilité du rendement de la plante à différents environnements : type de sol, positionnement de la parcelle de riz sur la toposéquence, pluviométrie. Ce modèle est constitué de deux réservoirs superposés : le premier représente les dix premiers centimètres de sol, le second correspondant au « subsoil » représente l'épaisseur de sol comprise entre dix centimètres et un mètre de profondeur.

Le modèle ORIZA développé par l'Université de Wageningen et l'Institut international de recherche sur le riz (Bouman *et al.* 2001) simule la croissance du riz et calcule son rendement en fonction des conditions hydriques du sol, du climat, et de l'état physiologique de la plante. Il se compose de plusieurs modules. PADDY,

module du bilan hydrique, calcule l'humidité de la zone racinaire au pas de temps journalier. Il se compose d'un seul réservoir représentant l'horizon de sol labouré caractérisé par une forte perméabilité et une partie inférieure moins perméable qui représente les variations du niveau de la nappe phréatique. Il prend en compte la plus grande compaction de l'horizon de labour et la formation des fentes de dessiccation qui apparaissent sur les terrains particulièrement argileux, responsables respectivement d'une diminution et d'une augmentation de la percolation. Les écoulements hypodermiques entre parcelles voisines et la percolation de la zone labourée vers la nappe phréatique sont calculés en fonction de la pression hydrostatique. Une fonction calcule le potentiel hydrique du sol en fonction de sa composition et de son humidité. La remontée capillaire depuis la nappe phréatique, jouant un rôle important en période sèche, est également prise en compte dans le modèle : elle n'a lieu que lorsque le potentiel hydrique du sol dépasse la capacité au champ. La transpiration de la plante est calculée en fonction du potentiel hydrique et dépend de la présence éventuelle d'une lame d'eau dans le casier. Ce modèle inclut une fonction « irrigation » qui permet d'ajouter un volume d'eau en variable d'entrée.

Le modèle de Suzuki *et al.* (2001) se distingue des précédents par son aspect spatialisé : une toposéquence de neuf parcelles de riz communiquant entre elles par écoulement gravitaire est représentée. Ce modèle se compose de deux modules : un module hydrologique établissant le bilan hydrique de chaque parcelle au pas de temps journalier et un second module calculant la croissance du riz. Dans le module hydrologique, chaque parcelle est représentée par deux réservoirs superposés : le premier réservoir représente la hauteur de la lame d'eau superficielle et l'humidité de la zone racinaire. Le second réservoir représente l'eau de la nappe phréatique. Les réservoirs communiquent entre eux verticalement par percolation et latéralement par drainage, diffusion à travers les diguettes et écoulement hypodermique. Des mesures effectuées sur des parcelles expérimentales ont permis de calculer les coefficients régulant les différents transferts, notamment la conductivité hydraulique. Ce modèle doit permettre d'évaluer la stabilité de la production agricole dans un contexte de modification de l'occupation des sols.

Kam *et al.* (2001) ont développé un modèle spatialisé à l'échelle du nord-est de la Thaïlande pour étudier la distribution spatiale et temporelle du risque de sécheresse temporaire affectant la production rizicole. Ce modèle est basé sur un bilan hydrique à un seul réservoir incluant la lame d'eau superficielle et la zone racinaire. Il calcule la quantité d'eau disponible pour la plante au pas de temps hebdomadaire, en fonction de la texture du sol, de la pluie et de l'évapotranspiration Penman. Les hauteurs de pluies et l'évapotranspiration sont calculées pour chaque unité spatiale (un carré de 25 km²) à partir des données de 126 stations météorologiques réparties à travers la région. Pour chaque simulation, un seul type de sol, caractérisé par un taux de percolation et une fonction de rétention de l'eau, est utilisé pour l'ensemble de la région. Pour différentes périodes de l'année, et pour chaque type de sol, le modèle établit une carte de la région représentant la répartition des pertes de rendements du riz, calculée à partir des conditions hydrique du sol. En fonction de ces résultats, différentes recommandations concernant les variétés de riz à utiliser ou la conduite de la culture (notamment le mode d'implantation par repiquage ou semis direct) sont proposées.

I-3-2. Choix d'un modèle pour représenter l'interaction ressource - usages de l'eau.

Les principaux modèles hydrologiques conçus en riziculture inondée partagent le même objectif : calculer par un bilan hydrique la quantité d'eau disponible pour la plante et prévoir son rendement. Ces modèles intègrent généralement un module permettant de faire correspondre à une quantité d'eau disponible un degré de stress hydrique puis une baisse de rendement. Ces différents modèles sont une source d'inspiration précieuse pour la conception de notre modèle. Ils fournissent une représentation schématique et simple du fonctionnement hydrique de l'écosystème rizicole inondé et indiquent quels sont les principaux termes du bilan hydrique contrôlant les transferts au sein de cet écosystème. Cependant, la composante usage de l'eau y est quasi absente. Elle n'apparaît dans le module PADDY du modèle ORYZA 2000 que sous la forme d'un volume d'eau d'irrigation fixé comme variable d'entrée du modèle.

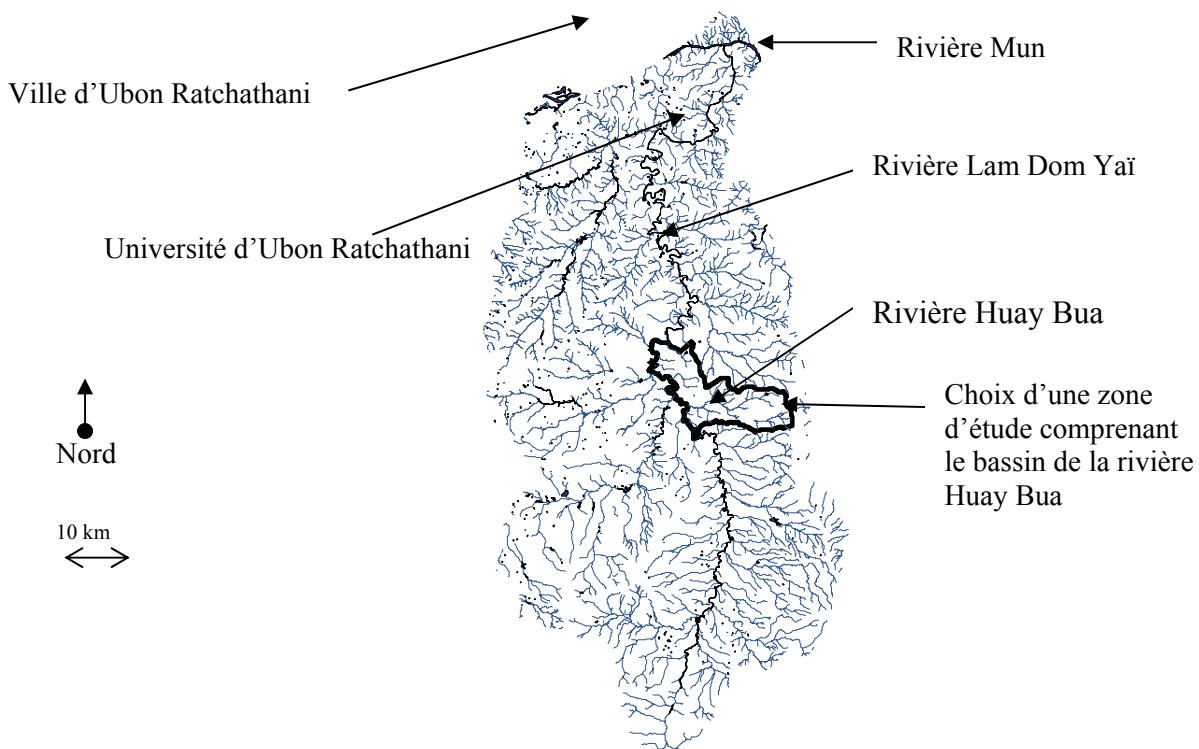
La représentation des interactions ressource – usages pour la compréhension des mécanismes d'adaptation nécessite un modèle qui puisse prendre en compte les principaux paramètres contrôlant la dynamique de la ressource et la diversité des modes d'utilisation de l'eau. Les systèmes multi-agents (SMA) sont particulièrement bien adaptés pour représenter et explorer la complexité de tels écosystèmes où la quantité d'eau varie dans l'espace et le temps sous le contrôle de processus naturels et anthropiques. Composés d'entités spatialisées, passives ou douées d'autonomie, situées dans un espace défini, les SMA se prêtent bien à la modélisation informatique afin d'étudier des interactions. Associés à la puissance et à la rapidité de calcul de l'ordinateur, ils permettent d'explorer, via simulations, le fonctionnement de systèmes où l'interaction entre processus bio-physiques et comportements humains génèrent une grande diversité de situations variables dans le temps et dans l'espace.

II. Investigations et analyses pour une meilleure connaissance de la zone étudiée.

II-1. Délimitation de la zone d'étude

L'idée initiale suggérée par nos partenaires de la Faculté d'agriculture consistant à s'intéresser à l'ensemble du bassin versant de la Lam Dom Yaï, s'est avérée finalement trop ambitieuse, compte tenu notamment du temps disponible pour le travail de terrain. Du point de vue biophysique, ce bassin de 4.800 km² est relativement homogène. Région exclusivement agricole, ses différentes activités sont uniformément réparties à l'échelle du bassin de la Lam Dom Yaï (Ly 2002, Phupak, com. perso.). L'altitude varie peu, de 120 mètres à l'embouchure de la Lam Dom Yaï, jusqu'à 160 mètres environ sur l'ensemble de la ligne de crête (à l'exception de la partie la plus en amont, bordant la frontière Cambodgienne, où le relief est beaucoup plus marqué avec des sommets culminant à plus de 500 mètres. Cependant, cette partie du bassin, majoritairement forestière et mise en réserve dans le cadre d'un parc naturel, présente peu d'intérêt pour notre étude. Le choix d'une zone représentative consistait donc à sélectionner une partie du bassin versant de la rivière Lam Dom Yaï représentant simultanément la diversité des fonctionnements hydrologiques, des modes d'accès à la ressource eau et des usages de l'eau en évitant toute redondance inutile. Ce choix devait également tenir compte des données disponibles.

Les recherches menées par le KКУ-Ford Cropping Systems Project (1982) montrent que le fonctionnement hydrologique de la région Isarn peut être représentée en un maillage de micro bassins versants correspondant généralement à des affluents de second ordre des deux principales rivières de la région, la Mun et la Chi. À l'intérieur de chaque micro bassin, la diversité des choix culturels et des modes de conduite culturale reflète l'hétérogénéité des conditions d'accès aux ressources en eau. Les dénominations terres basses (« lowlands ») ou hautes (« uplands »), généralement admises, permettent de distinguer les zones de dépressions, plus humides, aux terrains alluvionnaires les plus fertiles, des parties hautes des toposéquences jouxtant des plateaux, aux sols sableux, aux cultures beaucoup plus sensibles aux périodes de sécheresse. La délimitation de la zone d'étude repose donc sur le choix d'un affluent de la rivière Lam Dom Yaï dont nous étudierons le sous-bassin versant.



Carte 5 : Réseau hydrographique de la rivière Lam Dom Yaï et délimitation de la zone étudiée.

Le bassin de la rivière Huay Bua (Carte 5) convenait pour plusieurs raisons. Il présente un profil topographique représentatif de la région avec des altitudes comprises entre 130 et 160 mètres. L'occupation des terres (avec une riziculture inondée très largement dominante) et les pratiques culturales, la diversité des sols, des modes d'accès à la ressource en eau et des moyens de stockage de l'eau (puits, bassins privés et collectifs, étangs naturels ou artificiels, petits barrages sur ruisseaux) caractéristiques du bassin de la Lam Dom Yaï y sont bien représentés (JICA, 1992). La taille de ce sous bassin d'environ 75 km² et sa localisation par rapport à la Faculté d'agriculture d'UBU permettaient de le parcourir facilement dans la journée lors des enquêtes et des observations de terrain. En outre, il fait partie d'une « Land Reform Area » pour laquelle M. Surajit Phupak dispose d'un grand nombre de données biophysiques sous SIG.

II-2. Analyse de la pluviométrie

L'ensemble des analyses a été réalisé à partir des données journalières des stations pluviométriques de la province d'Ubon Ratchathani, gracieusement fournies par la station météorologique de l'aéroport d'Ubon Ratchathani, au prix d'une certaine patience ! Sept stations ont été retenues pour l'analyse et ont été choisies en fonction de leur emplacement par rapport à la région étudiée. La figure 2 montre leurs localisations.

Emplacement des 7 stations pluviométriques encadrant la zone étudiée

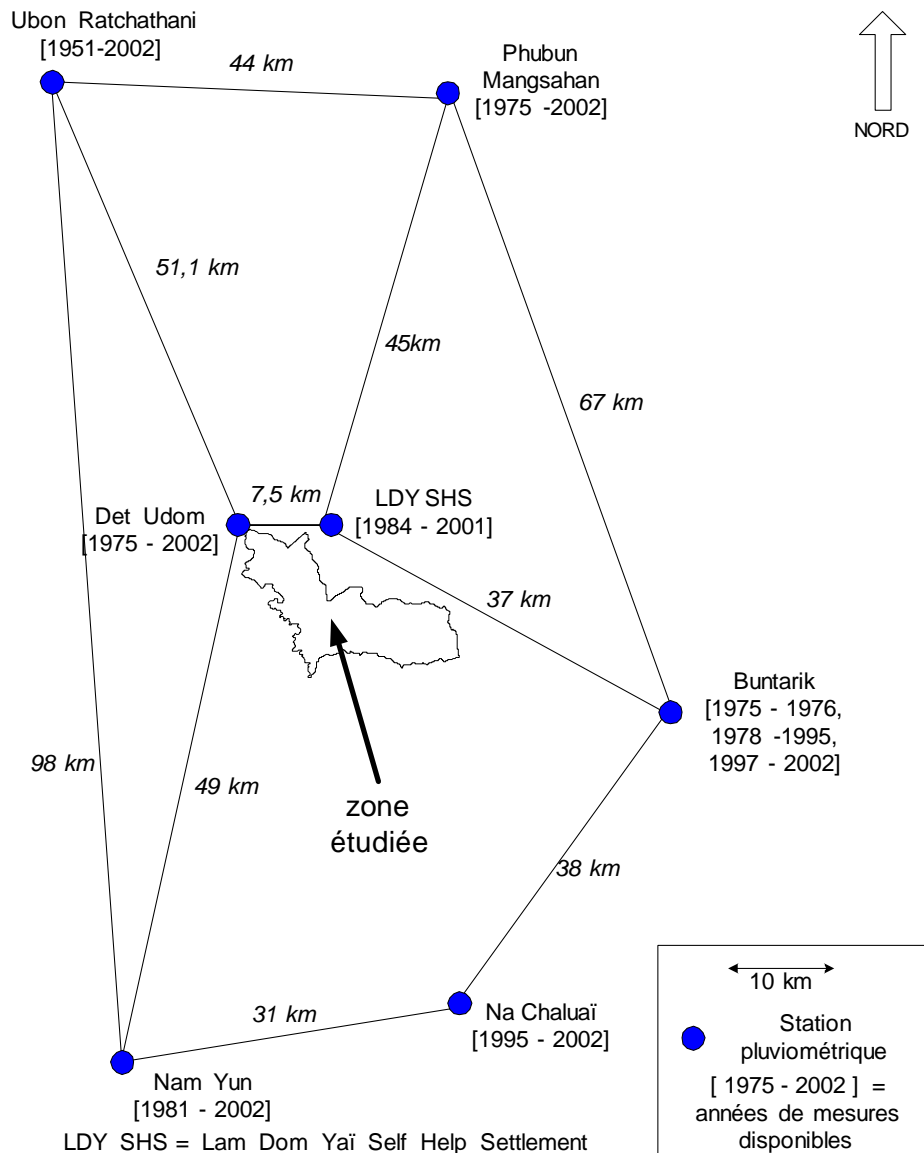


Figure 2. Emplacement des 7 stations pluviométriques par rapport à la zone étudiée

II-2-1. Analyse de la variabilité temporelle de la pluviométrie.

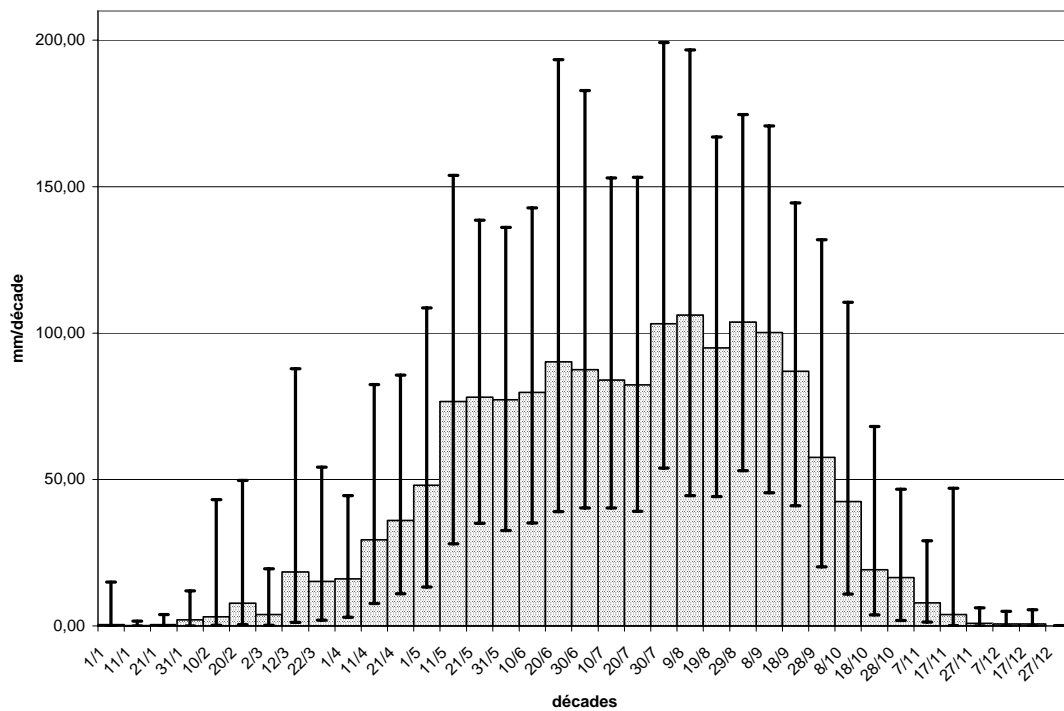


Figure 3. Hauteurs pluviométriques décadales moyennes et écarts types calculés sur les années 1951 à 2002 à la station pluviométrique d'Ubon Ratchathani.

Bien que la différence des hauteurs pluviométriques soit bien marquée entre les saisons (Figure 3), les variations interannuelles des hauteurs pluviométriques pour une même période de l'année sont souvent extrêmes avec, au pas de temps décadaire et pendant la saison des pluies (mai à octobre), des écarts-types représentant entre 50 et 150% de la moyenne interannuelle. Le caractère erratique des pluies du nord-est Thaïlandais est ainsi confirmé.

Pour quantifier la répartition temporelle des pluies et estimer la probabilité d'occurrence des années sèches et humides, une analyse fréquentielle de la pluviométrie par la méthode des quintiles a été réalisée pour la station d'Ubon Ratchathani. Les données pluviométriques décadales des 50 dernières années sont classées dans un ordre croissant puis partagées en 5 « quintiles » de 10 relevés annuels chacun. Les valeurs les plus élevées de chaque « quintile » correspondent à sa borne supérieure et des situations très pluvieuses, pluvieuses, normale, sèche et très sèche sont définies par rapport à la médiane. Les probabilités de non dépassement des hauteurs pluviométriques correspondant au 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} quintile sont respectivement de 20%, 40%, 60%, 80% et 100%.

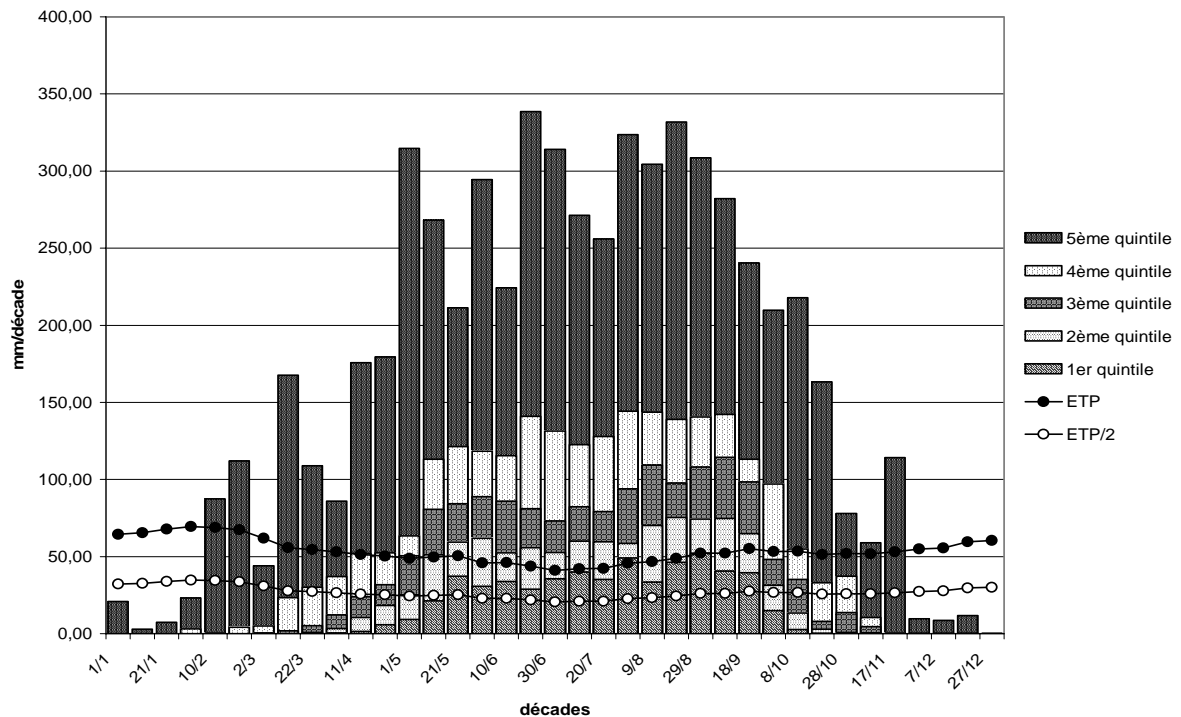


Figure 4. Analyse fréquentielle de la pluviométrie à la station d'Ubon Ratchathani (de 1953 à 2002)

Cette analyse fréquentielle (Figure 4), illustre parfaitement :

- l'importante variabilité interannuelle de la pluviosité, pendant toute la saison des pluies (décade 21/04 à décade 28/09),
- la possibilité, bien qu'avec une faible probabilité, d'avoir des pluies supérieures à 50 mm/décade en début et fin de saison sèche (octobre-novembre et mars-avril).

II-2-2. Analyse de la variabilité spatiale de la pluviométrie.

La comparaison de la pluviosité aux différentes stations n'est possible que pour les groupes de stations bénéficiant d'années de mesures communes. Quatre groupes sont identifiés et sont formés respectivement :

- des 7 stations pour 5 années (1997 - 2001),
- de 6 stations (sans la station de Na Chaluai) pour 17 années (1984 - 1995 et 1997 - 2001),
- de 4 stations (Det-Udom, Buntarik, Aéroport Ubon et Nam Yun) pour 14 années (1981 - 1995 et 1997 - 2001),
- de 3 stations (Det-Udom, Buntarik et Aéroport Ubon) pour 26 années (1975 - 1976, 1978-1995, 1997-2001).

Les années manquantes sont dues à l'absence de mesures pour seulement 1 ou 2 mois, malheureusement pluvieux, ce qui rend inexploitable la mesure du total annuel.

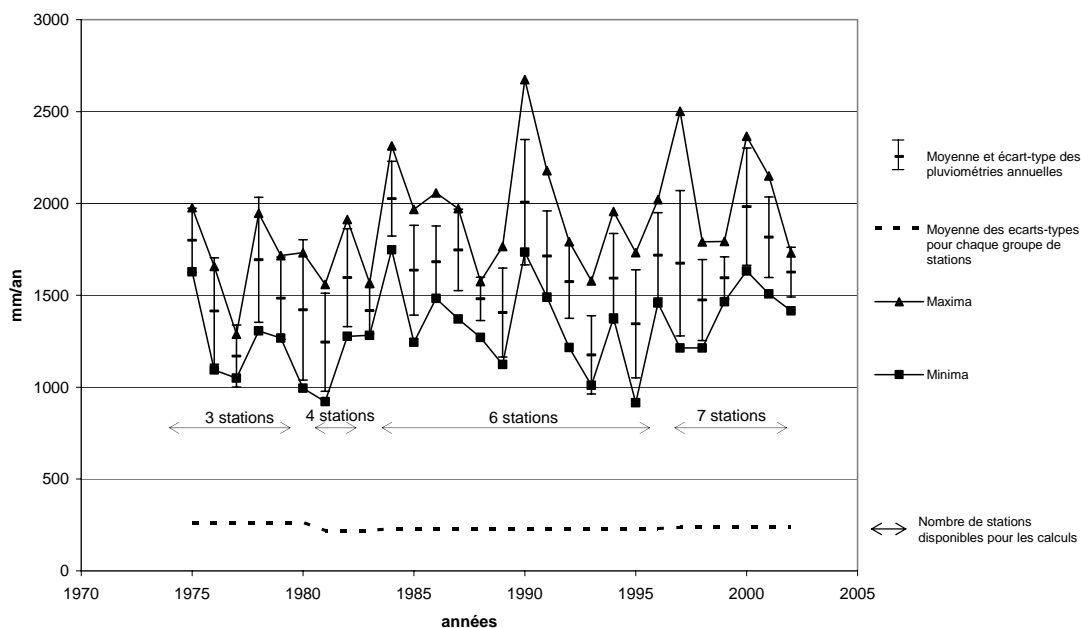


Figure 5 : Moyennes et écart-type des hauteurs pluviométriques annuelles des 7 stations retenues.

La figure 5 révèle une répartition inégale des précipitations dans la zone étudiée. Chaque année, la différence entre les hauteurs de pluie minimale et maximale enregistrées aux différentes stations avoisine les 500 mm (environ 2 écarts-types), soit près de 33% de la pluviométrie annuelle moyenne de la région (1500 mm). Il existe donc une grande disparité dans la distribution spatiale des hauteurs annuelles de pluie. Afin de savoir si cette hétérogénéité est statique (pleut-il toujours plus au même endroit ?), une représentation de l'évolution dans le temps des moyennes annuelles pour chaque station est nécessaire.

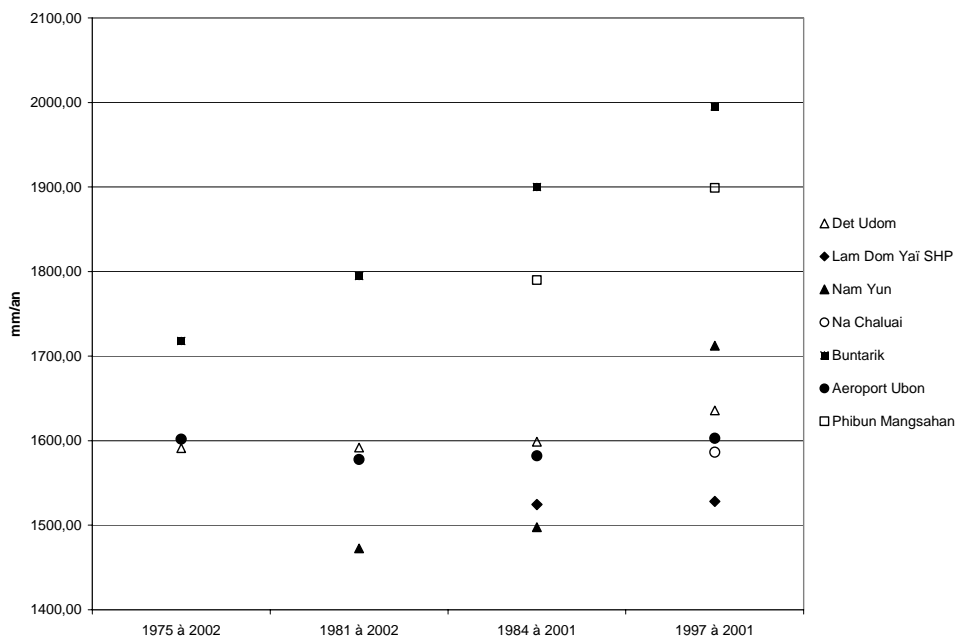


Figure 6 : Comparaison des moyennes annuelles de la pluviosité entre les stations.

La figure 6 doit être appréhendée en terme de variabilité spatiale uniquement, car la comparaison des valeurs entre 2 années est biaisée par la différence du nombre de stations prises en compte. Cette figure illustre une stabilité dans le temps de la distribution spatiale des pluies : les hauteurs annuelles de Buntarik sont largement supérieures à la moyenne provinciale de 1500 mm (KKU-Ford Cropping Systems Project, 1982). Cette distribution des hauteurs de pluie selon un gradient décroissant est-ouest est liée à la formation de masse d'air humides sur le golf du Siam entraînées vers le nord-est par les courants de mousson (KKU-Ford Cropping Systems Project, 1982). Ce gradient est-ouest est sans doute amplifié par la présence du lac artificiel au nord de Buntarik, apparu après la construction du barrage sur la rivière Lam Dom Noi dans les années 70 et la déforestation plus intense sur la partie ouest.

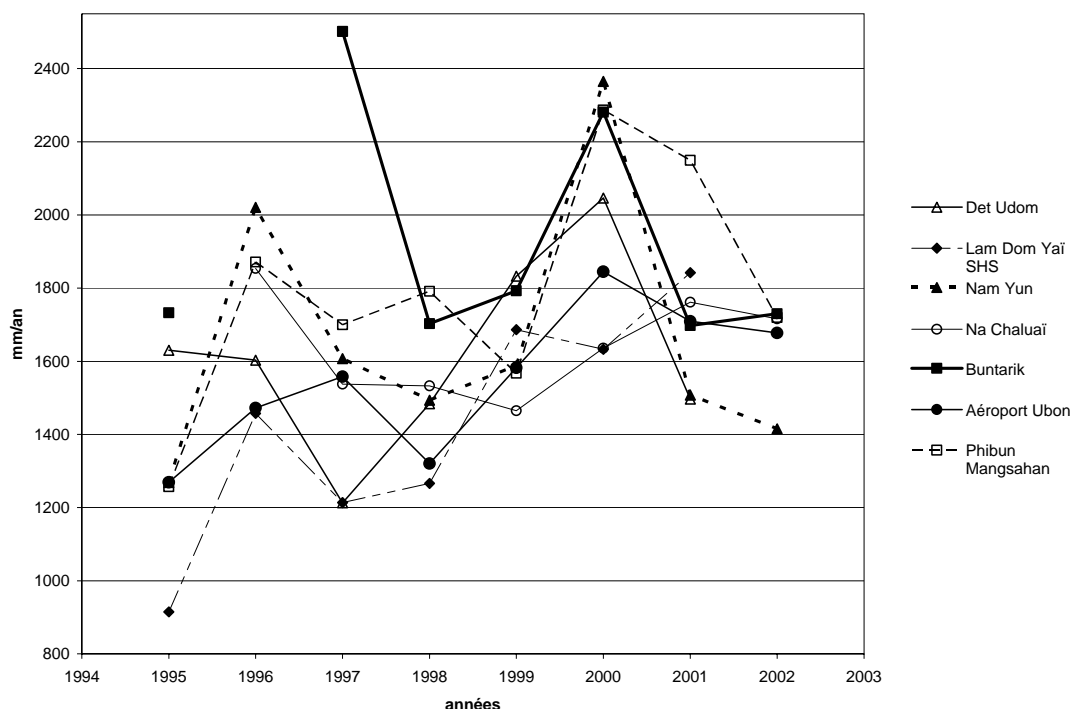


Figure 7 : Variations interannuelles des hauteurs pluviométriques annuelles.

La figure 7 montre que les hauteurs pluviométriques annuelles varient dans le même sens pour les 7 stations. Une analyse en composantes principales normées réalisée pour les hauteurs pluviométriques annuelles (Figure 43, tab. 3, et 4, annexes II) confirme cette co-variation avec des années 1995 et 1998 sèches et des années 1996, 2000 et 2001 humides avec cependant une opposition entre Buntarik (humide en 1997 et en 2000) et Na Chaluai (humide en 1996, 2001 et 2002). Un test au seuil 0,05% sur la matrice des corrélations (Tableau 2, annexes II) montre une bonne corrélation des hauteurs pluviométriques entre les stations d'Ubon Ratchathani, de Phibun Mangsahan et de Lam Dom Yai SHS.

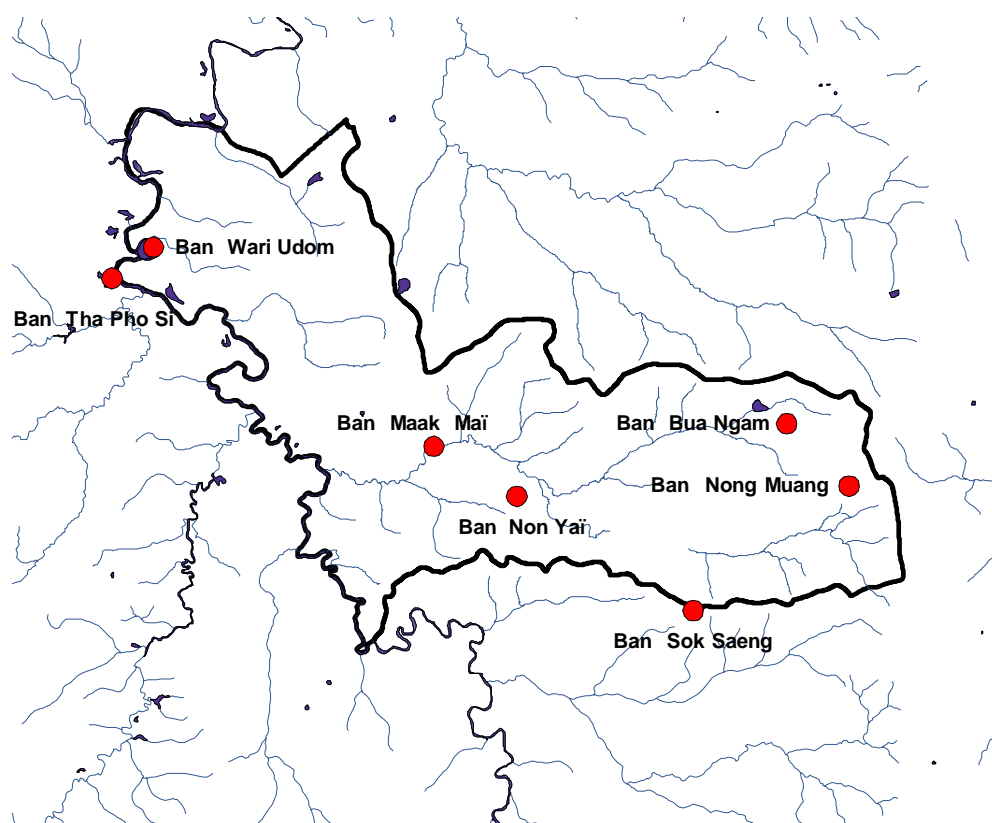
Une ACP normée sur les hauteurs pluviométriques mensuelles, décadaires et journalières (Figure 44, tableaux 5 et 6, annexes II) aboutit à une opposition entre les stations du nord (Lam Dom Yai SHS, Phibun et Det Udom) qui ont un régime pluviométrique d'allure plus uni modal avec de fortes pluies en mai, juin, juillet, par rapport aux stations du sud (Na Chaluai, Nam Yun et Buntarik) présentant un régime pluviométrique plus bimodal avec moins de pluies en juillet mais plus en septembre et octobre.

III. Compréhension des usages de l'eau par enquêtes en milieu paysan

III-1. Préparation des enquêtes

Aucun travail de recherche sur les usages de l'eau en interaction avec la dynamique de la ressource n'a été réalisé à ce jour dans la province d'Ubon Ratchathani. La meilleure façon de se procurer les informations nécessaires fût donc d'aller enquêter directement auprès des villageois. Les objectifs complémentaires de ces enquêtes consistaient à identifier les principaux besoins et usages de l'eau, à comprendre les processus de décision associés, la perception des agriculteurs sur la variabilité des pluies et leurs stratégies d'adaptation.

Les villages enquêtés ont été choisis en fonction de leur emplacement le long de la toposéquence, sur l'axe délimité par la rivière Lam Dom Yaï en aval et la ligne de crête en amont, ainsi que selon leur positionnement transversal par rapport à la rivière Huay Bua. 32 agriculteurs ont été rencontrés dans les sept villages suivants : Ban Mak Mai, Ban Bua Ngam, Ban Sok Saeng, Ban Wari Udom, Ban Tha Po-Si, Ban Nong Muang et Ban Non Yai (Carte 6).



Carte 6. Localisation des villages enquêtés et délimitation de la zone d'étude

J'étais accompagné d'un traducteur de la Faculté d'UBU, connaisseur des lieux. La visite du village commençait par la rencontre de son chef pour lui signaler notre présence et recueillir ses impressions générales sur l'utilisation des ressources en eau

et des problèmes inhérents à l'échelle de son village. Puis il nous indiquait les personnes à rencontrer en fonction de nos souhaits. Un guide d'entretien semi-structuré servait de fil conducteur aux conversations tout en offrant aux agriculteurs la possibilité de s'exprimer librement et de s'attarder sur les points qu'ils jugeaient plus importants (annexes III).

III-2. Résultats

Au cours des déplacements à travers la zone d'étude, une première observation confirme les connaissances bibliographiques : de nombreux bassins sont régulièrement disséminés sur l'ensemble du territoire. Les enquêtes ont permis d'approfondir les connaissances déjà acquises : environ 80% des agriculteurs ont au moins un bassin. Ils en possèdent généralement deux par exploitation agricole. Leur densité est évaluée à environ un bassin pour 1,6 hectare de surface agricole utile. Ces bassins, de forme rectangulaire, ont une surface moyenne de 400 m² et une profondeur moyenne de 3 mètres.

La majorité des bassins conservent l'eau toute l'année, avec des niveaux minimum variant de 20 centimètres à 2 mètres à la fin du mois d'avril, juste avant le début de la saison des pluies. Ces petits bassins ne sont pas les seuls points d'eau utilisables.



Photographie 2 : L'un des 3 barrages de la rivière Huay Bua, près du village Ban Maak Mai
6 mars 2003.

Il existe également plusieurs grands bassins collectifs, résultant généralement de la construction d'un barrage sur un ruisseau (Photographie 2), du curage d'une mare ou d'un étang naturel. D'autres grands bassins ont été intégralement creusés sur décisions gouvernementales. Ils sont généralement peu exploités. Les raisons données par les villageois sont diverses : ils sont profonds et la grande dénivellation entre les

surfaces du sol et de l'eau occasionne un coût de pompage élevé. Ils sont généralement mal positionnés par rapport aux parcelles à irriguer. De plus, bien qu'ils soient collectifs et libres d'accès, les paysans préfèrent utiliser leurs propres aménagements. Le problème de l'accessibilité concerne également certains agriculteurs positionnés le long de la rivière Lam Dom Yai. Bien que les réserves en eau de ce réservoir naturel soient quasiment illimitées à l'échelle de leurs besoins, il reste sous-exploité, faute d'équipements et à cause du coût prohibitif du pompage compte tenu du niveau bas des prix agricoles.

Enfin, l'ensemble des enquêtes révèle un développement récent de « puits » d'un diamètre moyen 20 cm et d'une profondeur moyenne de 25 mètres, remplaçant les forages traditionnels de 10 cm de diamètre et 15 mètres de profondeur. Combinés à l'utilisation de pompes, ils autorisent les cultures de contre-saison à des emplacements où aucune ressource en eau n'était autrefois disponible. Ce développement semble s'expliquer par l'apparition, depuis cinq ans environ, de nouveaux outils autorisant des forages plus larges et plus profonds. Ces nouvelles techniques ne privilégient cependant qu'une fraction aisée de la population.

L'analyse des résultats d'enquêtes permet d'identifier trois principales activités dépendant de la variabilité des pluies et/ou de l'accès aux autres ressources en eau : la préparation des pépinières de riz, le repiquage et le maraîchage de contre saison.

III-2-1. La préparation des pépinières de riz.



Photographie 3. Mise en eau et préparation des pépinières de riz près du village Ban Wari Udom 22 avril 2003.

Dans la partie méridionale du nord-est de la Thaïlande où se situe notre zone d'étude, la principale culture pratiquée est le riz inondé qui occupe plus de 80% de la surface agricole utile dans le bassin versant de la Lam Dom Yaï. Avant d'être repiqué dans les casiers endigués, les semences de riz sont généralement semées en pépinière dans notre zone d'étude. Idéalement, une lame d'eau de quelques centimètres d'épaisseur est maintenue dans la pépinière en permanence jusqu'à la date du repiquage (environ 1 mois plus tard). La culture des jeunes plants de riz en pépinière permet à la plante de commencer son cycle au début des pluies, alors que la préparation des parcelles est en train de se faire, le repiquage des plants permettant un contrôle efficace des mauvaises herbes. Ainsi, les plants sont généralement conservés dans les pépinières entre 1 et 2 mois (en cas de repiquage retardé) jusqu'à ce que les conditions météorologiques assurent une humidité suffisante pour qu'ils puissent être repiqués.

Plusieurs processus de décision liés à l'eau interviennent dans la gestion des pépinières : ils concernent la date de préparation des pépinières et du semis, le positionnement et le nombre de pépinières.

Dates de préparation des pépinières et des semis

Traditionnellement, les premiers semis débutent avec l'arrivée de la saison des pluies entre la mi et la fin avril. Ils peuvent s'étaler jusqu'au début du mois de juin. Les pépinières sont préparées généralement deux semaines avant leur semis. Un

premier labour au motoculteur enfouit les mauvaises herbes. Un second labour, effectué juste avant le semis permet de réduire les transferts d'eau verticaux en détruisant les agrégats du sol.

Le choix de la date de semis dépend de l'intensité des pluies, du coût de la main d'œuvre pour le repiquage et des objectifs agronomiques. La plupart des paysans rencontrés (25 sur 32) ont une préférence pour le semis précoce et l'explique par trois raisons : le moindre coût de la main d'œuvre au moment du repiquage à la mi-mai, lorsque les pépinières à repiquer sont encore peu nombreuses et la main d'œuvre largement disponible ; la possibilité d'un repiquage précoce, maximisant la durée de la phase végétative du cycle rizicole au cours de laquelle la plante accumule la biomasse nécessaire à la formation des graines à partir de la floraison ; une récolte plus précoce obtenant un meilleur prix d'achat dans le cas de la variété RD15 destinée à la vente et qui est de type non photopériodique. Seuls quelques paysans ont accès à des quantités d'eau suffisantes leur permettant de semer systématiquement dès la mi-avril alors que les pluies sont encore très éparées. La plupart des paysans ne possédant souvent qu'un ou deux petits bassins restent très dépendants du régime des pluies et préfère que l'humidité naturelle du sol soit suffisante pour commencer la préparation des pépinières et leurs semis. Ils peuvent ainsi reculer la date de semis jusqu'à mi-juin. Dans le cas de semis tardifs, les paysans déclarent choisir la date en fonction :

- de la quantité d'eau présente dans les parcelles : le sol de la pépinière doit être saturé en eau et recouvert, dans les meilleurs cas, d'une lame d'eau de plusieurs centimètres.

- du calendrier et de l'expérience des années passées : la présence d'une lame d'eau dans la pépinière après une forte averse début avril, n'incitera pas le paysan à semer, conscient du caractère exceptionnel de cet événement et de la forte probabilité pour qu'il soit suivi par plusieurs semaines de sécheresse pouvant être fatales aux jeunes plants. Enfin, certains paysans déclarent qu'une année particulièrement sèche aura plus de chance d'être suivie d'une année humide, impression susceptible d'influencer leurs choix.

Positionnement des pépinières

Bien qu'il ne repose pas uniquement sur des critères liés à l'eau (nature du sol, proximité des axes de communication, des habitations), l'emplacement des pépinières est en partie orienté par la facilité d'accès à cette ressource. Au cours des visites sur les exploitations, les paysans nous montrent l'emplacement de leurs futures pépinières, qui sont presque toujours situées dans les zones les plus basses de la toposéquence, correspondant aux endroits les plus humides et à proximité des points d'eau.

Nombre de pépinières

Il est généralement lié au nombre de périodes de repiquage prévues par l'agriculteur, dépendant des variétés cultivées, « précoce » ou « tardive ». Les paysans pensent qu'une variété tardive doit être repiquée en premier pour bénéficier d'une plus longue phase végétative donnant de meilleurs rendements. Ils prévoient donc autant de pépinières qu'il y aura de périodes de repiquage. Dans les grandes

exploitations rizicoles (environ 8 paysans rencontrés), il arrive que le nombre de pépinières dépende également des quantités d'eau disponibles pour leur préparation : le volume d'eau stocké dans les bassins est parfois insuffisant pour permettre une préparation et un semis simultanés de l'ensemble des pépinières. Une à deux semaines d'intervalle est souvent observée entre deux dates de semis, correspondant au temps de recharge en eau du bassin, par infiltration et/ou grâce aux précipitations.

III-2-2. Le repiquage

Il a lieu théoriquement quatre à cinq semaines après le semis des plants en pépinières entre fin mai et début août (après la rémission des pluies du mois de juillet). Les principales décisions concernent la date et le lieu de repiquage :

Date de repiquage

Les surfaces à repiquer étant beaucoup plus importantes que celles des pépinières (plusieurs hectares : le rapport « surface des pépinières/surface repiquée » est généralement compris entre 1 et 10), les stocks d'eau disponibles ne suffisent généralement pas à irriguer les parcelles en cas de déficit pluviométrique. Le choix de la date du repiquage est donc plus influencé par le régime pluviométrique que pour le semis. Cependant, certains agriculteurs disposant de grands volumes d'eau pour l'irrigation, peuvent repiquer précocement sans risque. Cette situation semble rare car elle correspond seulement au cas de 2 agriculteurs parmi les 32 rencontrés.

Le choix de la date de repiquage dépend également du calendrier et de l'expérience des années passées. Certains optent par exemple pour une stratégie « ultra sécuritaire » et choisissent d'attendre le pic des pluies du mois d'août pour repiquer (concerne surtout les paysans qui n'ont pas de bassins au moment des enquêtes). Cependant, cette option réduit considérablement la durée de la phase végétative, avec pour résultat des potentiels de rendement plus limités.

L'âge des plants dans les pépinières joue également un rôle important : plus d'un mois après le semis, il devient urgent de repiquer les plants, qui, en devenant trop âgés, développent des entre-nœuds réduisant la taille des grains. Les stratégies choisies sont variables : certains attendent jusqu'à 2 mois après le semis en cas de faibles pluies alors que d'autres préfèrent minimiser la période passée en pépinière pour limiter la dégradation des plants. Cette solution présente un risque de stress hydrique au cours de la phase d'enracinement, après le repiquage, moins dommageable à ce stade qu'un déficit à la floraison. L'un des paysans rencontrés, dépourvu de bassin, a opté pour une option radicale : si 2 mois après leur semis, les jeunes plants ne peuvent toujours pas être repiqués car l'humidité des parcelles est insuffisante, il abandonne ses rizières et part travailler à Bangkok pour nourrir sa famille la saison suivante.

Lorsque la pluie est le seul facteur influençant le choix de la date de repiquage (plants âgés d'un mois environ et période calendaire favorable au repiquage), les paysans déclarent choisir le jour du repiquage en fonction de la quantité d'eau présente dans les parcelles, et non l'intensité des dernières pluies, beaucoup plus difficilement quantifiable. Les critères de décisions varient d'une zone à l'autre : les

paysans situés dans les zones de bas-fonds attendent généralement l'apparition d'une lame d'eau de plus de 10 cm, alors que dans les rizières hautes, une humidité du sol proche de la saturation est jugée suffisante.

D'autres facteurs, indépendants de la pluie, conditionnent également le choix de la date de repiquage : il peut s'agir des variétés cultivées présentant des degrés variables de résistance à la sécheresse et autorisant donc un repiquage dans des sols plus ou moins humides, de la disponibilité en force de travail, etc.

Le lieu du repiquage

Une distinction est faite entre les parcelles de bas-fond mieux pourvues en eau et les parcelles hautes plus fréquemment sujettes aux périodes de sécheresse. Les paysans préfèrent repiquer le riz « glutineux » destiné surtout à l'autoconsommation dans les parties les plus basses et réservent les zones de plateaux au riz « non-glutineux » surtout destiné à la vente. Ce choix privilégie donc la sécurité alimentaire, devant un intérêt économique.

En synthèse, une comparaison entre le calendrier cultural et la variabilité du cycle des saisons selon la méthode de Franquin (Franquin, 1973) permet d'illustrer simplement l'adaptation à la variabilité des agriculteurs : une comparaison décadaire (Figure 4) des pluviométries et de l'évapotranspiration potentielle moyenne (ETP Penman, données journalières disponibles pour la station d'Ubon Ratchathani depuis 1966) permet de délimiter les quatre saisons agricoles (sèche, pré-humide, humide et post-humide) ainsi que leur variabilité interannuelle (Figure 8).

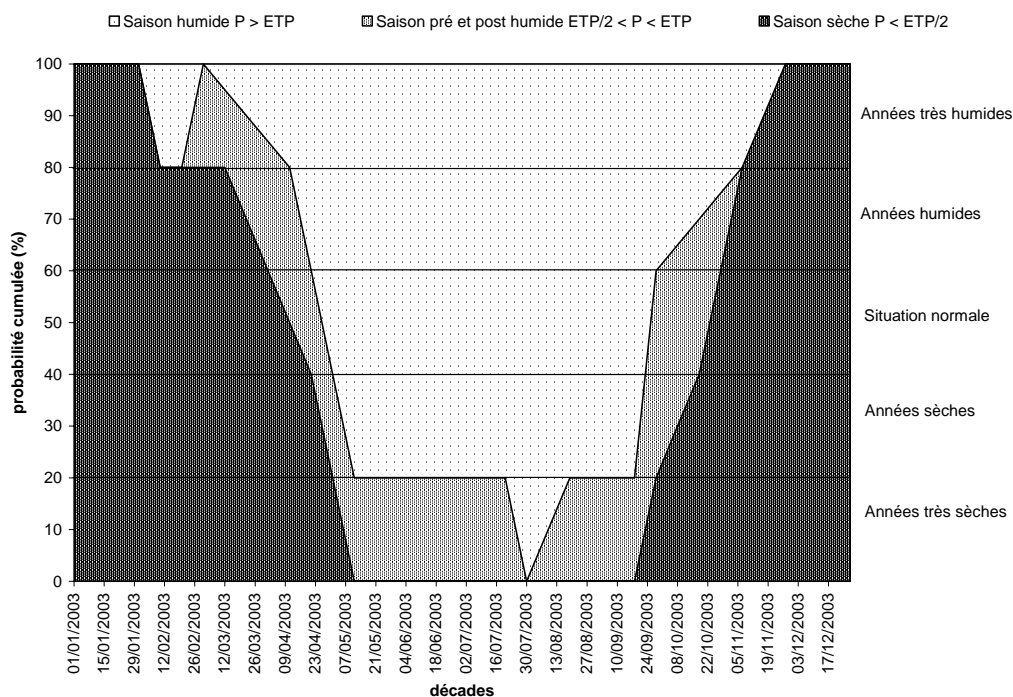


Figure 8. Variabilité interannuelle du cycle saisonnier selon la méthode de Franquin

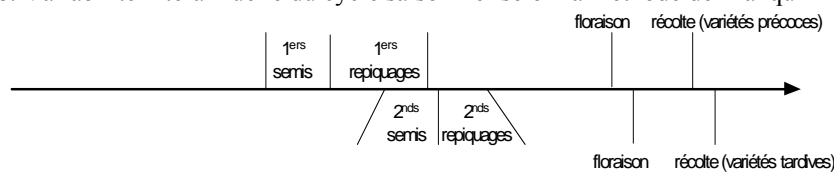


Figure 9. Alternance des saisons par la méthode de Franquin et calage du cycle cultural.

La figure 9 présente le calendrier cultural du riz inondé pratiqué dans le bassin versant de la Lam Dom Yaï. Par comparaison avec la figure 8, il apparaît qu'une année sur cinq, le climat peut être sec au moment habituel des premiers semis en pépinière (la quasi-totalité des rizières de la zone sont repiquées et non semées directement) alors que la deuxième série de semis ne correspond jamais à une période sèche.

La floraison, période au cours de laquelle la plante est particulièrement sensible au manque d'eau peut être exceptionnellement affectée par une année sèche ou très sèche, particulièrement pour les variétés tardives. En revanche, la période de récolte qui exige un assèchement préalable des casiers durant la phase de remplissage et de maturation du grain lors du dernier mois peut être très pluvieuse une années sur cinq pour les cultivars précoces.

Cette première comparaison entre rythme des saisons et calendrier cultural illustre l'adaptation des pratiques culturales au régime pluviométrique. Le décalage dans le temps des deux principales périodes pour le semis des pépinières et le repiquage des plants (généralement âgés de 30-35 jours) permet aux riziculteurs de se prémunir contre le risque de sécheresse (faible probabilité pour qu'une sécheresse survienne la même année simultanément aux cours des 2 pics de semis ou de repiquages) tout en leur donnant la possibilité (au prix parfois d'une surconsommation, mais peu onéreuse, de semences) de profiter des premières pluies

abondantes certaines années pour réaliser une installation précoce de la culture permettant aux plants de disposer d'une longue phase végétative pour accumuler de la matière sèche et donc d'un potentiel de rendement en grain plus élevé, avant la phase reproductive strictement déterminée par leur comportement photopériodique. L'utilisation combinée de variétés tardives et précoces permet d'étaler dans le temps les périodes de récolte et réduit ainsi la probabilité de perdre toute la production récoltée en cas d'année exceptionnellement humide.

Avec le basculement de la région du nord-est vers une économie de marché (Formoso, 1997), les nouvelles exigences de productivité agricole nécessitent de semer les variétés commercialisables toujours plus précocement. Ces nouveaux objectifs qui exigent une anticipation du début de cycle cultural sur l'arrivée de la saison des pluies s'accompagnent du développement de nombreux petits bassins au niveau de l'exploitation. **Une question d'actualité est l'évaluation de l'efficacité de ces bassins pour identifier d'éventuelles voies d'amélioration (Patamatamkul, 2001).**

III-2-3. Le maraîchage de contre-saison

Il désigne l'ensemble des cultures maraîchères effectuées pendant la saison sèche, surtout durant sa première partie, plus fraîche. Il débute habituellement après la récolte de riz, fin octobre (pour les variétés précoces du type RD15). Après avoir écouté les 32 agriculteurs, il s'avère être l'une des seules activités agricoles possibles pendant la saison sèche, et ses faibles besoins en eau sont compatibles avec les ressources disponibles. En dehors de l'élevage et de l'artisanat, il constitue également l'une des seules activités économiques possibles à l'échelle du village pendant la saison sèche. Son développement est donc l'une des voies possibles pour l'amélioration des conditions économiques de la région et la limitation des migrations saisonnières vers les villes.

Le maraîchage de contre saison consiste généralement en cultures de piment, concombre, arachide, aubergine, tomate et pastèques. Certains font également de l'horticulture : manguiers (notamment autour des bassins), anacardiens (noix de cajou), papayers, fleurs de jasmin ou autres espèces florales pour la confection de guirlandes. Ces cultures pérennes, peu répandues, ne seront pas étudiées ici car, non irriguées, elles sont jugées moins intéressantes pour l'analyse des interactions avec les variations de la ressource en eau. Ces cultures sont principalement destinées à l'autoconsommation. Mais certains paysans se spécialisent dans une production commerciale.

Les enquêtes ont permis de mettre en évidence deux aspects de ces pratiques culturelles liées à la ressource en eau :

- une décroissance globale des superficies en cultures de contre saison de l'aval vers l'amont du sous-bassin versant. La décroissance des points d'eau de l'aval vers l'amont pourrait être une explication logique. Cependant, la première cause donnée par les agriculteurs est la densité et l'état du réseau des voies de communication : il est moins développé dans les parties hautes du bassin, plus éloignées des centres urbains et économiques locaux (villes de

Det-Udom et Buntarik) rendant plus difficile et plus coûteux l'accès aux marchés. Cette explication rejoint certainement la première puisque les agglomérations se sont développées le long des cours d'eau (Det-Udom signifie abondance en thaïlandais).

- une sous-exploitation générale des ressources en eau disponibles : à l'époque des enquêtes (en mars, au cœur de la saison sèche), la majorité des bassins étaient remplis. Et pourtant, dans de nombreux cas, l'eau n'était pas utilisée. Les raisons évoquées sont multiples :

- la tradition : après la récolte du riz, on préfère se reposer, surtout si l'on est sûr d'avoir assez de riz pour se nourrir pendant toute l'année,
- le coût d'exploitation : (pompage, équipement en tuyaux),
- le prix des légumes sur le marché : il est souvent jugé trop bas pour que la culture soit rentable. Les jeunes préfèrent partir travailler en ville : le coût d'investissement est nul, le gain est immédiat et le risque économique plus limité,
- La main d'œuvre insuffisante.

Cependant, une tendance au développement des cultures maraîchères de contre saison est perceptible sur la zone d'étude : les paysans commercialisent leur production seulement depuis quelques années. Ils ont souvent le projet d'accroître leur production, en s'équipant avec de nouvelles pompes plus puissantes. Ce développement est également lié à la poursuite de l'électrification des villages, permettant l'utilisation de pompes électriques, au coût de fonctionnement moins élevé que celui des pompes diesel.

L'identification de l'événement incitant un paysan à commencer à faire du maraîchage de contre saison est très délicate. D'après les enquêtes, il semblerait qu'il soit lié à la popularisation de l'utilisation des pompes dans les villages et à l'émulation entre agriculteurs.

Les usages domestiques (alimentation, hygiène) et destinés à l'abreuvement des animaux sont négligeables devant les usages agricoles. Ils ne seront pas pris en compte dans la modélisation.

Les enquêtes recroisées avec les observations de terrain ont également permis d'identifier des grands changements dans les pratiques culturales : multiplication des puits à large diamètre permettant d'installer des pépinières dans les zones hautes, aplanissement et agrandissement des parcelles de riz pour limiter les besoins en eau (lame d'eau d'épaisseur égale sur toute la parcelle si la surface est parfaitement horizontale) et permettre une motorisation de la récolte, multiplication des cultures maraîchères de contre-saison pour la commercialisation.

Ces changements de pratiques auront certainement des conséquences sur les stocks d'eau disponibles en saison sèche. Que se passera-t-il si les points de pompage dans la nappe se multiplient ? Y aura-t-il encore assez d'eau pour les usages domestiques et l'élevage au cours de la saison sèche ?

IV. Intégration des connaissances par la modélisation

IV-1. Conceptualisation d'un modèle

La construction d'un modèle SMA nécessite une phase de conceptualisation au cours de laquelle les composantes du système et les relations qui les lient sont formalisées et repérées dans un espace pourvu d'une métrique (Ferber, 1995). La conceptualisation d'un modèle est une représentation possible parmi d'autres d'un monde réel. Elle prend forme selon les objectifs du modèle qui en détermine la structure.

IV-1-1. Les objectifs du modèle

La conceptualisation de la partie biophysique du modèle doit permettre de représenter le plus fidèlement, mais aussi le plus simplement possible, les principaux phénomènes contrôlant la dynamique de l'hydrologie de surface de la zone étudiée. Compte tenu des connaissances acquises sur les modèles existants pour la région et en intégrant les informations recueillies lors des enquêtes, il est déjà possible d'identifier quatre fonctions pour le modèle. Il doit permettre de calculer, en chaque point de l'espace et à différents instants :

- la hauteur de la lame d'eau dans chaque casier rizicole, pouvant avoir un effet sur les dates de semis ou de repiquage, la réalisation d'une irrigation,
- la hauteur du niveau de l'eau dans les bassins et les rivières, influençant le choix des points d'eau à utiliser pour l'irrigation,
- le niveau d'humidité des différentes parcelles exondées, pris en compte lors du semis des pépinières et du repiquage,
- la profondeur de la nappe phréatique, contrôlant via la percolation, l'humidité de la zone racinaire, et représentant un stock d'eau potentiellement disponible pour l'irrigation du riz et des maraîchers pendant la saison sèche, via le forage de puits.

Il doit permettre en outre de représenter les principaux éléments impliqués dans les processus de prise de décision sur les usages de l'eau, notamment l'organisation spatiale des zones sources et des zones consommatrices d'eau.

Le modèle doit donc représenter la variation de ces volumes d'eau au cours de l'année, en fonction des facteurs biophysiques connus et quantifiables (précipitation, évapotranspiration, sol, topographie) et des activités anthropiques.

IV-1-2. L'espace et le temps dans le modèle

Les enquêtes effectuées montrent que l'emplacement de la parcelle et notamment son positionnement par rapport aux ressources en eau importe dans les choix des pratiques culturales aux stades du semis et du repiquage du riz. La variation de la nature du sol d'une parcelle à l'autre (Oberthür *et al.*, 2000) peut également influencer les prises de décision sur le choix de l'emplacement des pépinières (généralement sur les sols les plus fertiles à composante sableuse faible) et sur la

décision d'irriguer (l'humidité et la rétention en eau varient selon les types de sol). La maille élémentaire du modèle doit donc permettre de distinguer deux parcelles juxtaposées. La taille moyenne d'une parcelle étant de 800 m² environ (estimation effectuée lors des observations de terrain), la modélisation de l'intégralité du sous bassin versant de 75 km², nécessiterait la représentation de plus de 90.000 parcelles. Or les principales dynamiques des usages à représenter se font au sein d'une même exploitation agricole dépassant rarement dix hectares. L'hydrologie de surface qui détermine les principaux usages de l'eau se définit assez simplement à l'échelle du sous bassin : elle doit être caractérisée en terme de variations des conditions hydriques du sol en fonction du positionnement sur la toposéquence et de la nature des sols en présence, en terme de densité et répartition spatiale des points d'eau utilisés pour l'irrigation. Cette diversité hydrologique peut être facilement représentée sur une surface réelle beaucoup plus petite que l'ensemble du bassin de la rivière Huay Bua. Compte tenu de ces remarques, l'espace virtuel conceptualisé représentera finalement une surface réelle de 0,5 km² représentant ainsi 625 parcelles. Cette réduction aura également l'avantage de réduire les temps de calcul pendant les simulations.

Cette réduction pourra engendrer quelques problèmes d'échelle comme la distance entre les points d'eau et les parcelles à irriguer : la densité surfacique des bassins devra donc être respectée dans ce changement d'échelle afin de préserver une distance moyenne entre bassins et parcelles proche de la réalité. Le problème apparaît plus compliqué pour les rivières : l'idée est de conserver, dans l'espace modélisé, l'organisation du réseau hydrographique avec la rivière Huay Bua traversant d'est en ouest le sous bassin pour se jeter dans la rivière Lam Dom Yaï coulant, dans la partie ouest, du sud vers le nord. Dans un espace limité, centré sur ces rivières, la proportion de parcelles proches des rivières est artificiellement augmentée. Cet artéfact pouvant introduire un biais dans l'analyse des processus de décision liés aux distances, il devra être pris en compte dans les études de sensibilité des paramètres.

Les enquêtes ont aussi montré que l'une des principales décisions concernant l'utilisation de l'eau a trait au choix de la date pour les opérations de semis des pépinières et de repiquage des jeunes plantules. Bien souvent, une seule pluie journalière est suffisante pour déclencher le semis ou le repiquage. Le pas de temps du modèle doit donc être égal à la journée.

IV-1-3. Structure et fonctionnement du modèle

Les enquêtes indiquent que l'usage principal de l'eau pratiqué dans la zone étudiée est l'irrigation de complément des pépinières de riz, puis au moment des repiquages, ainsi que des cultures maraîchères de contre-saison.

Les irrigations correspondent au transfert d'un volume d'eau entre deux catégories d'entités hydrologiques: une catégorie « *source* » qui regroupe les entités « bassin », « rivière » et « nappe phréatique » et une catégorie « usage » représentée uniquement par l'entité « parcelle ». Chaque entité est composée d'un ou plusieurs réservoirs, qui ont la possibilité d'échanger des volumes d'eau naturellement (processus hydrologiques) ou artificiellement (pompage). Les figures 10, 11 et 12 illustrent le fonctionnement hydrologique du modèle à structure « bicouche ». La première couche est composée des entités « nappe » et « rivière », la seconde, superposée à la première, est composée des entités « parcelle » et « bassin ».

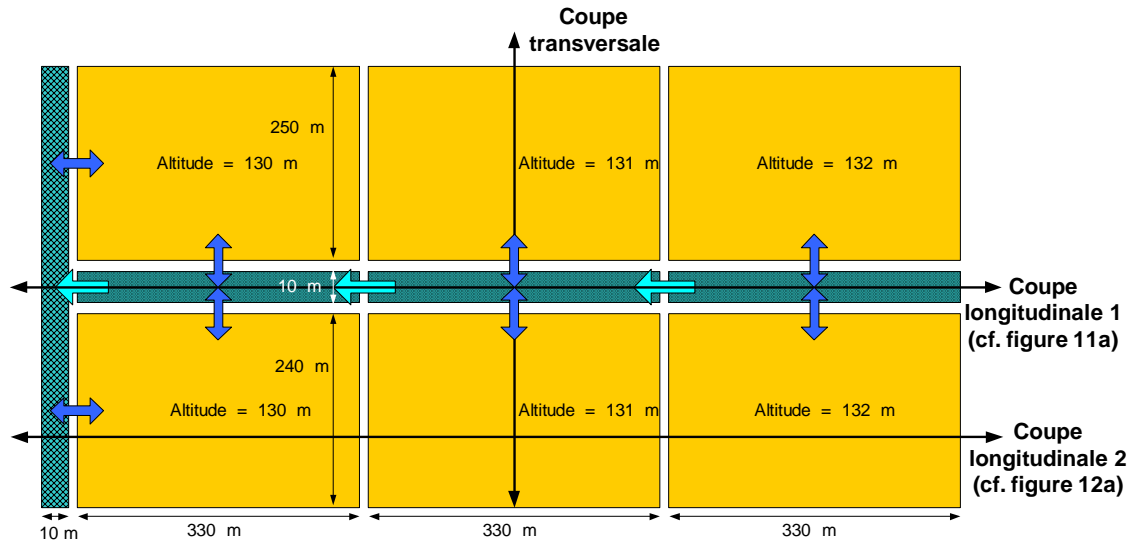
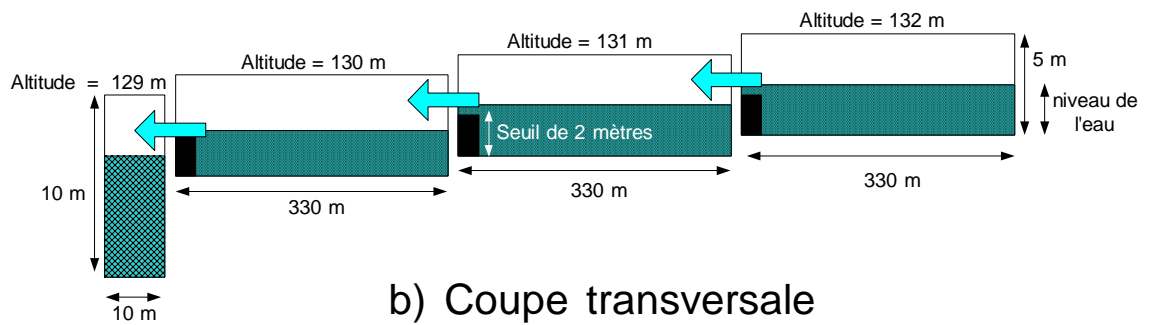


Figure 10 : Vue aérienne de la couche d'entités « nappe » et « rivière ».

a) Coupe longitudinale 1



b) Coupe transversale

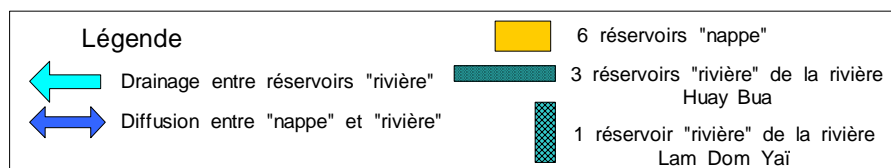
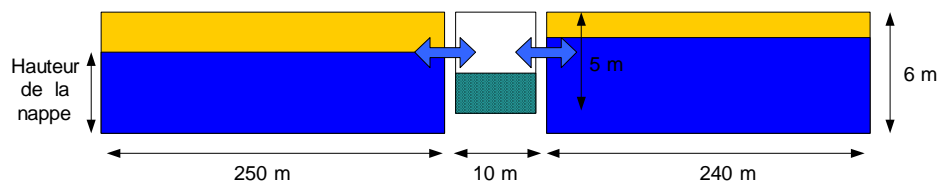
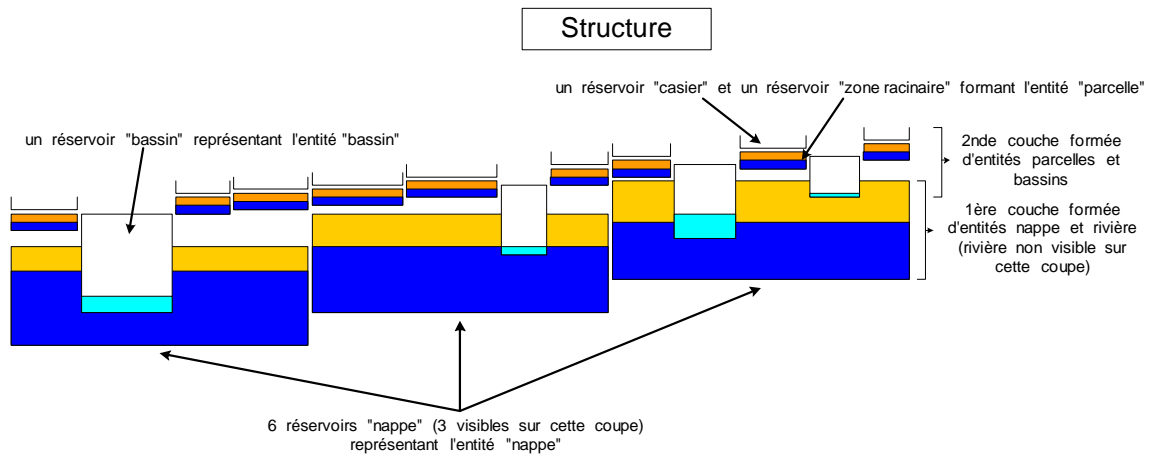


Figure 11 : a) vue longitudinale.
b) coupe transversale.

a) Coupe Longitudinale 2



Coupe Transversale

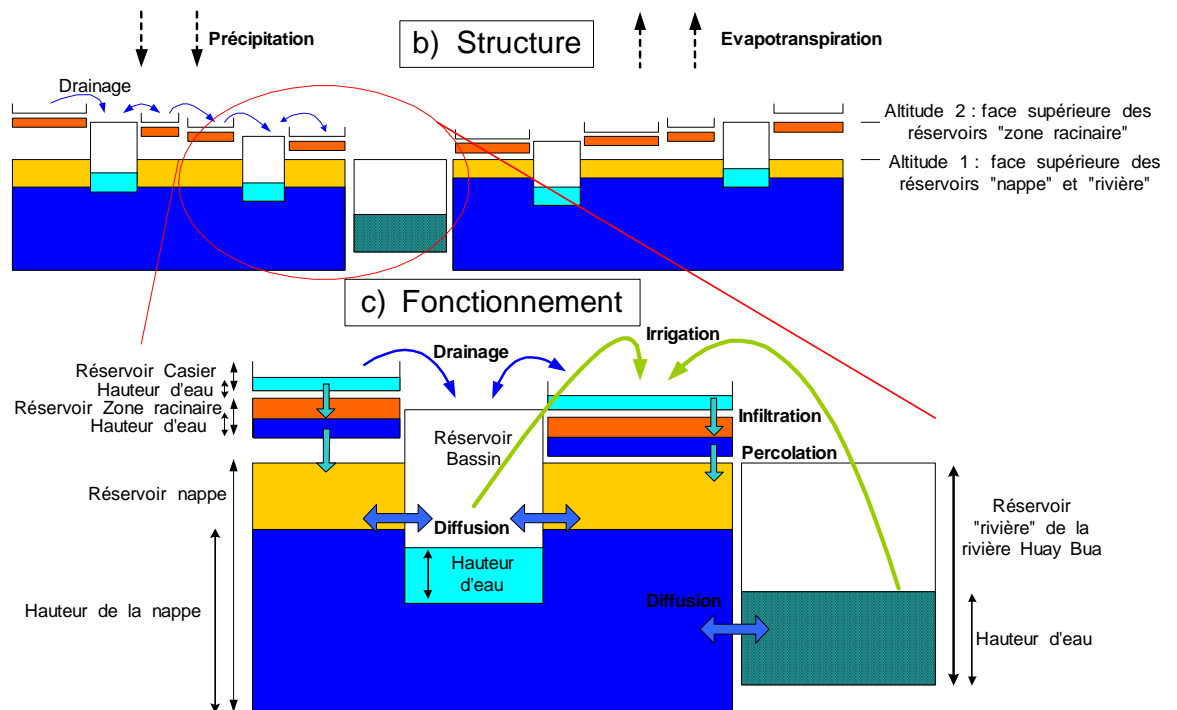


Figure 12 : Seconde couche formée des entités « parcelle » et « bassin » et superposée à la première couche.

- a) Structure en vue longitudinale
- b) Structure en vue transversale
- c) Fonctionnement/dynamique de la ressource en eau en vue transversale

IV-1-3-1. La couche nappe et rivière

La possibilité de représenter la nappe par autant de réservoirs qu'il y avait de parcelles (avec une réelle distribution spatiale des échanges hydrogéologiques) fut envisagée initialement. Une adaptation de la loi de Darcy pour les milieux insaturés semblait convenir pour calculer les transferts entre chaque réservoir de la nappe. Cependant, l'absence, confirmée par Srisuk *et al.* (2001), de données précises sur les

propriétés hydrauliques des sols pour des profondeurs supérieures au niveau de la zone racinaire obligea à reconsidérer la conceptualisation du fonctionnement hydrologique de la nappe. Une simplification extrême aurait consisté à ne représenter la nappe que par un seul réservoir lui donnant alors un même niveau sur l'ensemble de la zone modélisée. Pour représenter les variations spatiales du niveau de son toit, la nappe est finalement représentée par six réservoirs, étagés deux à deux sur trois paliers, aux altitudes respectives de 130, 131 et 132 mètres. L'étagement sur ces trois niveaux permet ainsi de représenter la pente moyenne du toit de la nappe (0,3 %) sur la zone modélisée (JICA, 1992).

Trois barrages sont présents sur la rivière Huay Bua (JICA, 1992). Ils ont été construits par le gouvernement dans les années 90 pour lutter contre les problèmes de sécheresse. Au cœur de la saison sèche (6 mars 2003), la rivière ne coule plus et le volume d'eau stocké en amont du seuil (4 mètres de hauteur) est estimé à plusieurs dizaines de mètres cubes (Photographie 2). Cette retenue d'eau, restée inexploitée pendant longtemps, commence à être utilisée pour le maraîchage de contre saison par quelques riverains, récemment équipés d'une motopompe. La présence de ces retenues incite à représenter la rivière Huay Bua par plusieurs réservoirs en paliers, séparés par des seuils. Dans le modèle, seulement deux de ces seuils sont représentés compte tenu de la longueur du tronçon de rivière modélisé. Les réservoirs successifs de la rivière Huay Bua sont étagés sur trois niveaux, égaux aux étages de la nappe. Chacun des trois réservoirs de la rivière Huay Bua draine les eaux des deux réservoirs de la nappe qui l'encadrent. L'eau de chaque réservoir de la rivière Huay Bua se déverse par drainage en aval dans le réservoir voisin. Le tronçon de la rivière Lam Dom Yaï représenté, selon un axe sud-nord dans la partie ouest de la zone modélisée, est constitué par un seul réservoir à la côte de 129 mètres, qui recueille les eaux du réservoir le plus en aval de la rivière Huay Bua.

La fonction utilisée pour calculer les quantités d'eau diffusées entre nappe et rivière est détaillée sur la figure 13.

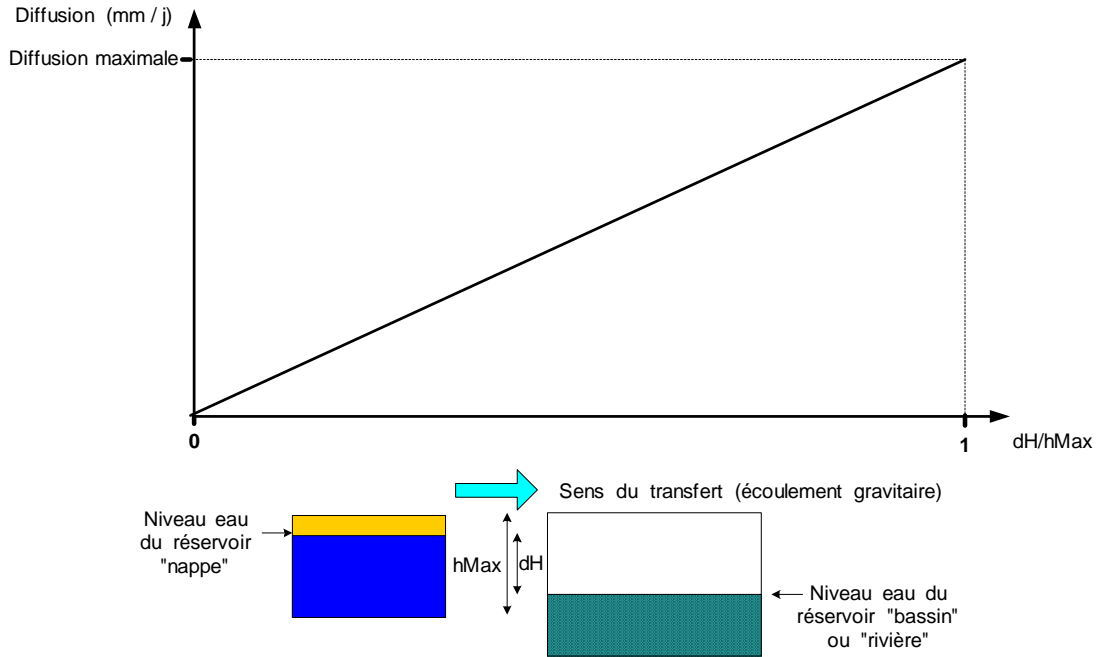


Figure 13. Diffusion de l'eau entre nappe et rivière (et entre nappe et bassin cf. paragraphe IV-1-3-2-2).

dH est l'écart entre les niveaux d'eau des deux réservoirs impliqués dans le transfert, maximisée par la hauteur d'eau du réservoir le plus élevé. $hMax$ est la hauteur maximale à travers laquelle le transfert peut s'effectuer. La profondeur des réservoirs « nappe » (six mètres) dépasse d'un mètre celle des réservoirs « rivière » de la rivière Huay Bua (cinq mètres) ce qui permet à la rivière de se vider complètement, surtout pendant la saison sèche, si le niveau de la nappe descend plus bas.

IV-1-3-2. La couche parcelles et bassins

La conceptualisation de la structure de cette deuxième couche du modèle consiste à représenter l'organisation spatiale des bassins et des parcelles telle qu'elle apparaît dans le paysage de la zone d'étude.

Les parcelles

Par analogie avec le monde réel, chaque parcelle du modèle porte un seul type de culture. Seules les parcelles susceptibles d'être temporairement irriguées sont représentées : les pépinières de riz, les casiers de riz repiqué et les parcelles maraîchères. Les vergers, très peu irrigués, peu fréquents et généralement de taille réduite, sont absents du modèle. La taille des parcelles est variable. Les observations de terrain ont permis d'évaluer à 800 m^2 la superficie moyenne d'une parcelle, avec des variations comprises entre 100 et 1600 m^2 . Conformément à la réalité, les plus petites parcelles du modèle correspondent aux pépinières et représentent 10 % des surfaces rizicoles repiquées (Trébuil, com. pers.). Dans le bassin versant de la Lam Dom Yaï, les surfaces cultivées en riz, maraîchers et autres se répartissent respectivement dans les proportions de 85%, 0,64% et 14,26%, résultats du travail d'enquête sur la typologie des systèmes agraires de S. Ly (Ly, 2002). Comme les autres cultures ne sont pas représentées dans le modèle, les parcelles rizicoles et

maraîchères doivent finalement se partager les surfaces dans les proportions respectives de 99 et 1%.

Chaque parcelle est constituée de deux réservoirs : un réservoir « casier » qui contient le volume d'eau retenu en surface par les diguettes de vingt centimètres de hauteur en moyenne et un réservoir « zone racinaire » qui représente le volume d'eau contenu dans les trente premiers centimètres de sol de chaque parcelle.

Une fonction « drainage » s'applique au réservoir « casier » comme aux autres réservoirs à eau libre : rivière, bassin et casier. Elle évacue l'eau excédant la hauteur des parois du réservoir (diguette pour les casiers, seuil pour les rivières, parois latérales pour les bassins) vers les réservoirs à eau libre les plus proches situés en aval. La fonction drainage appliquée au réservoir le plus en aval de la rivière Huay Bua permet en outre de calculer son débit à l'exutoire.

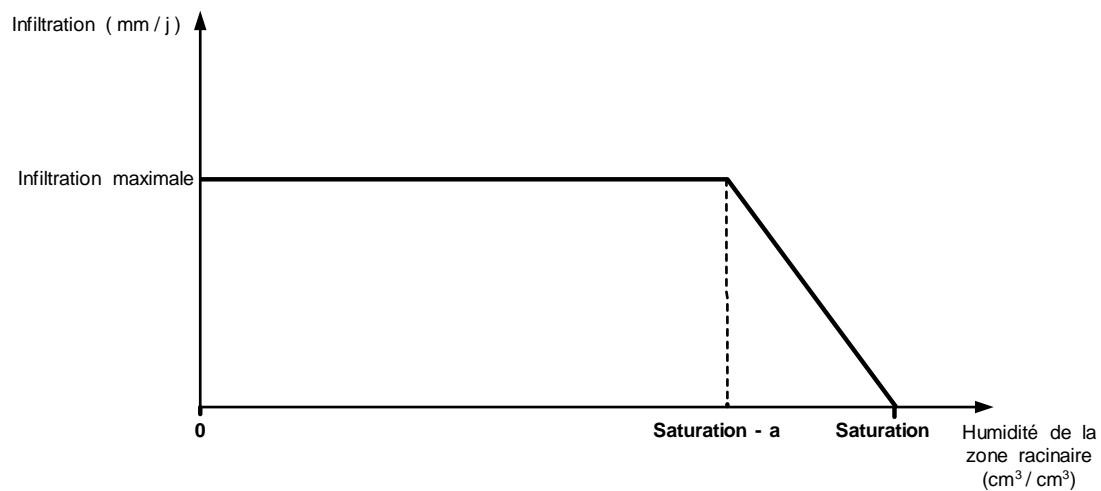


Figure 14. Infiltration de l'eau du casier vers la zone racinaire.

La fonction contrôlant l'infiltration (Figure 14) de l'eau, du casier vers la zone racinaire, est choisie de façon à être la plus simple possible. Elle ne dépend pas de l'épaisseur de la lame d'eau dans le casier mais n'est activée, bien sûr, qu'en présence d'eau en surface. Le coefficient « a », introduisant une valeur seuil, est choisi de façon à éviter des phénomènes d'oscillation artificielle affectant le niveau d'eau dans le réservoir « zone racinaire » ou d'équilibre dynamique empêchant le remplissage total du réservoir. Il sera ajusté lors de la phase de vérification du modèle.

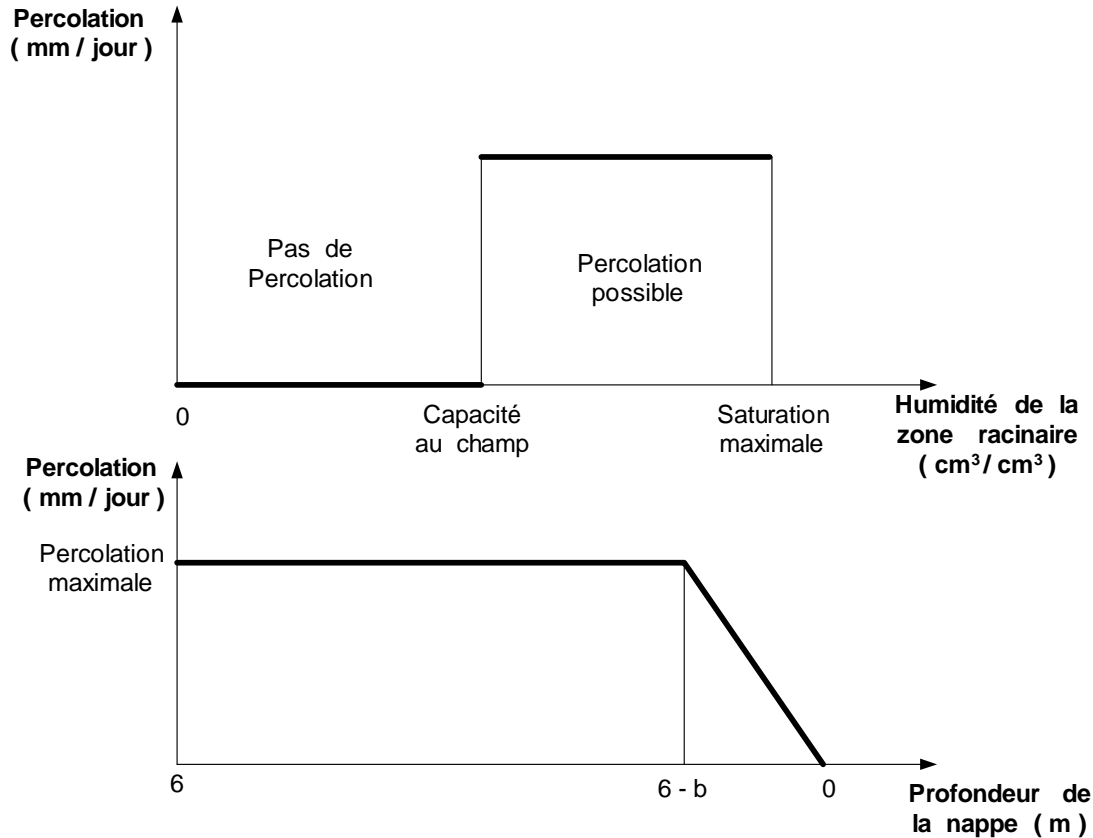


Figure 15. Percolation de l'eau de la zone racinaire vers la nappe
 a) Effet de l'humidité de la zone racinaire sur la percolation
 b) Effet de la profondeur de la nappe sur la percolation

Comme pour l'infiltration, la percolation, correspondant à un transfert d'eau de la zone racinaire vers la nappe (Figure 15), dépend du volume d'eau présent dans le réservoir récepteur, en l'occurrence la profondeur de la nappe. La profondeur maximale de la nappe est fixée à six mètres. Des relevés piézométriques réalisés dans le bassin de la rivière Lam Dom Yaï (Harnpichitvitaya *et al.* 2000 ; JICA, 1992) ont montré que la profondeur de la nappe n'excède généralement pas cette profondeur. Le coefficient « b » a le même rôle que « a » et devra aussi être ajusté lors de la phase de vérification du modèle. La percolation dépend également de la quantité d'eau présente dans le réservoir « zone racinaire ». Pour une humidité inférieure à la capacité au champ, il n'y a pas de percolation (Beau *et al.* 1989) et pour les valeurs supérieures, la percolation dépend uniquement de la profondeur de la nappe.

Les bassins

Comme pour les parcelles, la difficulté principale pour la représentation des bassins concerne leur nombre et leurs dimensions. Un retour sur le terrain à la fin du mois d'avril, au cœur de la saison sèche a permis de réaliser des enquêtes pour recueillir les informations nécessaires à la modélisation des bassins. Un questionnaire a été soumis à quinze paysans dans trois villages différents correspondant aux parties aval, centrale et amont du sous-bassin versant. Les questions suivantes ont été posées à chaque paysan : surface totale des terres cultivées, nombre de bassins possédés, dimensions de chaque bassin, hauteur minimale de l'eau dans chaque bassin pendant la saison sèche.

Les résultats obtenus sont :

- taille moyenne d'un bassin : 420 m^2 , avec des variations allant de 200 à 800 m^2 ,
- profondeur : 2 à 4 mètres,
- densité moyenne : 3 bassins pour 10 hectares cultivés.

Quinze bassins sont donc représentés sur les cinquante hectares modélisés :

- 2 bassins de 200 m^2 ,
- 3 bassins de 300 m^2 ,
- 5 bassins de 400 m^2 ,
- 3 bassins de 600 m^2 ,
- 2 bassins de 800 m^2 .

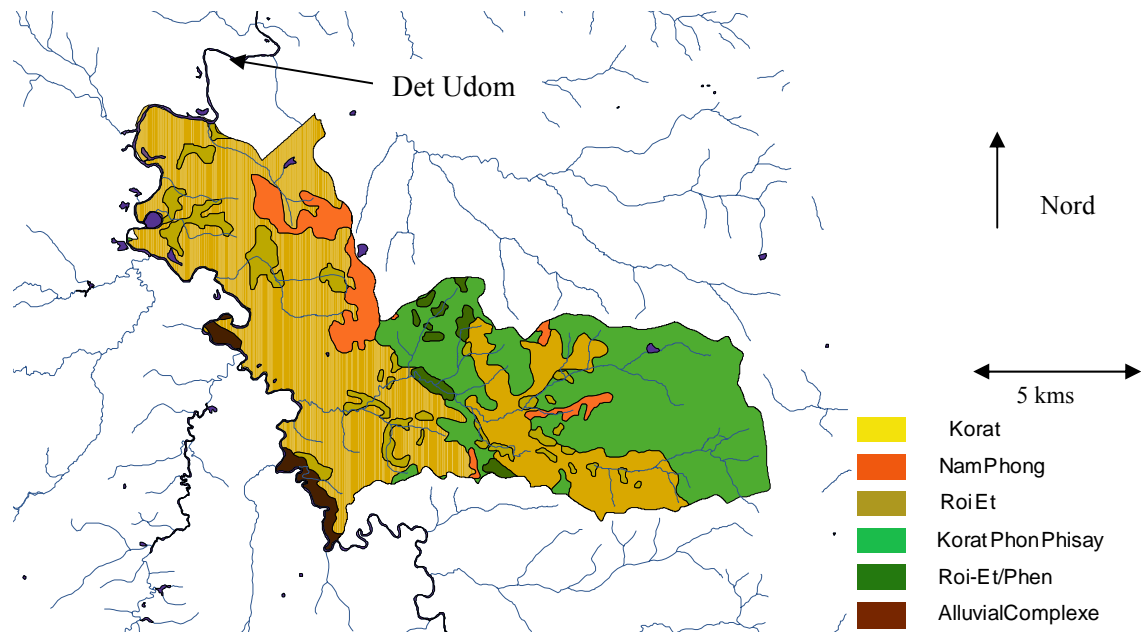
Il existe également quelques grands bassins collectifs de plusieurs hectares, construits par le gouvernement. Ils sont publics et généralement laissés en libre accès à la population locale pour l'irrigation des parcelles environnantes, la pêche, etc. Largement sous-exploités, sans doute à cause du prix du pompage de l'eau, ils ne seront pas représentés dans le modèle à ce stade.

Chaque bassin est constitué d'un seul réservoir. Sa face supérieure, ouverte, se situe à la surface du sol d'altitude 2 (Figure 12b). Sa partie inférieure « baigne » dans l'eau de la nappe. Il peut ainsi se remplir ou se vider par diffusion de l'eau entre la nappe et le bassin selon le même processus que les transferts d'eau entre nappe et rivière. La fonction utilisée est par conséquent la même (Figure 13).

La superposition des deux couches de réservoirs, dont les altitudes respectives varient différemment, permet ainsi de créer un environnement hydrologique artificiel contrôlé par des équations simples et restituant la diversité des conditions d'accès à la ressource en eau (bassins plus ou moins remplis en fonction de leur degré « d'immersion » dans la nappe, niveau de la rivière contrôlé en partie par l'arrivée d'eau de la nappe, etc...).

IV-1-4. Prise en compte de la variabilité spatiale des sols

Les trois transferts « infiltration », « percolation » et « diffusion » sont calculés à partir d'une valeur maximale intuitivement dépendante de la nature des sols. L'influence de la variabilité spatiale des sols de la zone d'étude (Oberthür *et al.*, 2000) sur l'hydrologie de surface peut ainsi être prise en compte dans le modèle par l'attribution de valeurs différentes pour ces 3 maxima.



Carte 7. Séries des sols dans la zone d'étude.

A partir des travaux d'Oberthür (Carte 7), six séries de sols sont identifiées dans la zone étudiée. Les données sur les propriétés hydrauliques de ces sols n'étant pas disponibles dans ses travaux, un travail de recherche supplémentaire s'avère nécessaire.

IV-1-4-1. La modélisation : un processus d'accompagnement de la recherche

Cette recherche consiste non seulement à identifier les sources d'information disponibles mais également à déterminer quelles sont les propriétés hydrauliques du sol, utiles pour le modèle. Au cours de cette investigation, la conceptualisation du modèle constitue un véritable guide pour le processus de construction, d'autant plus utile que l'on travaille ici dans un environnement caractérisé par la rareté des données secondaires et où il faut avancer en comblant les lacunes successivement identifiées (Bousquet *et al.*, 1997).

IV-1-4-2. A la recherche des données manquantes

Deux types de données sur les propriétés hydrauliques des sols sont jugés nécessaires :

- la porosité totale et l'humidité à la capacité au champ. Ces données permettront de faire correspondre un taux d'humidité du sol à la hauteur d'eau dans le réservoir « zone racinaire » et de calculer les fonctions « percolation » et « évapotranspiration ».
- la conductivité hydraulique qui permettra de fixer les valeurs maximales des fonctions « infiltration », « percolation » et « diffusion ».

La première source d'information identifiée est la notice de la carte des sols établie pour la région nord-est de la Thaïlande par le Land Development Department of Thailand (LDD, 1993). Elle ne présente malheureusement aucune valeur numérique pour les propriétés hydrauliques des sols et ne propose qu'une analyse détaillée de la composition texturale de chaque série de sols (% d'argile, % de sable et % de limon) en fonction de la profondeur. Il existe par ailleurs quelques valeurs expérimentales de conductivité hydraulique mesurées pour des séries de sols du nord-est de la Thaïlande (Akatanukul, 1985). Ces valeurs sont disponibles uniquement pour trois séries de notre zone d'étude (Annexes IV, tableau 8). Un autre travail réalisé en 1993-1994 sur les sols (Harnpichitvitaya *et al.*, 2000) avait consisté à étudier l'effet de la compaction des sols sur le taux de percolation dans des parcelles rizicoles expérimentales au sud de la province d'Ubon Ratchathani. A cette occasion, des valeurs de l'infiltration journalière sur parcelles cultivées, compactées et non compactées, avaient été mesurées (Annexes IV, tableaux 9 et 10). Après avoir localisé les parcelles expérimentales sur la carte des sols (légèrement au sud de Det Udom), elles s'avéraient appartenir à la série Korat.

Une comparaison de ces premières données numériques révèle une extrême hétérogénéité des valeurs. Ces différences peuvent être liées aux protocoles expérimentaux : l'infiltration est mesurée directement sur le sol en place dans les parcelles alors que la conductivité hydraulique est établie à partir d'échantillons prélevés et inévitablement remaniés. Elles confirment également les résultats d'Oberthür *et al.* (2000) en montrant que pour une même série de sols, les propriétés des sols peuvent varier considérablement à l'échelle parcellaire.

La période passée sur le terrain était trop courte pour entreprendre une nouvelle série de mesures spécifiques à la zone d'étude. Une idée « de secours » consista à estimer des valeurs de porosité, capacité au champ et conductivité hydraulique à partir de la composition texturale disponible pour les séries de sols. Saxton *et al.* (1986) proposent l'équation suivante en assumant que la porosité totale (p) du sol est égale à son taux d'humidité à saturation (θ_{sat}) et principalement déterminée par les teneurs en argile et sable du sol :

$$p \approx \theta_{sat} = 0,332 - 7,251 \times 10^{-4} (\% \text{ sable}) + 0,1276 \log_{10} (\% \text{ argile})$$

p et θ_{sat} en cm^3/cm^3

Après avoir observé que les teneurs en sable et en argile du sol sont respectivement proportionnelle et inversement proportionnelle à sa teneur en eau quand il atteint la capacité au champ, Ritchie (1999) propose une formule pour déterminer l'humidité absolue du sol à la capacité au champ (θ_{cc}) :

$$\theta_{cc} = \rho_b / \rho_w \times 0,186 \times [(\% \text{ sable}) / (\% \text{ argile})]^{-0,141}$$

θ_{cc} exprimée en m^3/m^3 .

ρ_b est la masse volumique du sol sec (après séchage à 105 degrés), exprimée en t/m^3

ρ_w est la densité du liquide en présence dans le sol. En l'occurrence, pour l'eau, $\rho_w = 1 \text{ t}/\text{m}^3$.

En supposant que la densité moyenne des particules qui composent le sol est égale à celle du quartz, $2,65 \text{ t}/\text{m}^3$, (les sols sont à composante siliceuse dans la région nord-est), la masse volumique du sol est calculée par la formule suivante : $\rho_b = 2,65(1-p)$.

Il existe également des équations permettant de calculer le coefficient de conductivité hydraulique à saturation. Cependant, la seule connaissance de la composition texturale du sol ne suffit pas, et les formules utilisées intègrent généralement un coefficient expérimental traduisant l'influence de la structure du sol. La fracturation des sols, par exemple, en cas de dessiccation des couches superficielles, augmente considérablement la perméabilité du sol (Bouman, 2001). Ahuja et William (Ahuja, 1989 – Williams, 1993) proposent ainsi une formule donnant une estimation de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) :

$$K_{sat} = B \times n_e^4$$

K_{sat} en mm/jour

B est un paramètre empirique

n_e est la porosité effective en m^3/m^3 qui s'obtient par le calcul suivant :

$$n_e = \theta_{sat} - \theta_{cc}$$

On se propose d'évaluer le paramètre B pour les sols du nord est de la Thaïlande en utilisant les mesures expérimentales d'Akatanukul (1985) (Tableau 10, annexes IV). La trop grande hétérogénéité de ces résultats ne permet pas de caler l'équation de Ahuja sur les sols de la zone d'étude. De plus, lorsqu'une valeur de B est choisie, égale à la moyenne des valeurs calculées précédemment, les conductivités

hydrauliques à saturation calculées augmentent avec la profondeur, en contradiction avec les valeurs mesurées par Akatanakul. La formule de Ahuja et Williams ne semble donc pas adaptée aux données dont on dispose car la conductivité hydraulique calculée, est, à travers le coefficient n_e , fonction croissante de la teneur en argile des sol. Or l'argile, lorsqu'elle se charge en eau, se gonfle et devient imperméable.

La solution finalement choisie consiste à calculer des valeurs moyennes à partir des mesures disponibles. Pour les séries manquantes, une valeur arbitraire de conductivité hydraulique moyenne est établie de la façon suivante : une classe texturale est tout d'abord attribuée pour chaque série et profondeur de sol en utilisant la méthode de classification texturale USDA (1991) (Tableau 12, annexes IV) à partir des données du LDD (1993). Ces classes texturales sont ensuite traduites en valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation en prenant la médiane des intervalles de valeurs proposés par la FAO (1990) (Tableau 11, annexes IV). Cette démarche permet d'obtenir finalement des valeurs de conductivité hydraulique à saturation pour les 5 séries de sols et deux niveaux de profondeur correspondant respectivement aux réservoirs « zone racinaire » et « nappe ». N'ayant aucune informations sur la série « Complexe alluvionnaire », ces valeurs sont égalées arbitrairement aux moyennes des valeurs des 5 autres séries. (Tableau 13, annexes IV). Un doute sur la validité de ces valeurs persiste car elles sont toujours largement supérieures aux valeurs généralement attribuées aux taux d'infiltration, de percolation et de diffusion dans les modèles de bilan hydrique en riziculture inondée appliqués au nord-est de la Thaïlande, comprises entre 5 et 20 mm/jour (Fukaï *et al.*, 2000 – Bouman *et al.*, 2001 – Suzuki *et al.*, 2001 – Kam *et al.*, 2001).

IV-1-4-3. Observation de terrain et reconsidérations des valeurs calculées pour les conductivités hydrauliques des sols



Photographie 4 : Gros plan sur une pépinière de riz
2 mai 2003.

L'observation du sol des pépinières déjà plantées le 2 mai 2003 montre une couche superficielle d'argile fracturée (Photographie 4). Cette croûte s'est formée au

cours d'un processus de mise en suspension des particules argileuses pendant l'immersion des casiers, suivi d'une sédimentation en surface puis solidification en bloque lors de l'assèchement de la parcelle. Cette formation est caractéristique des sols à composante argileuse, même faible, avec une quasi absence de matière organique et d'ions fixateurs (Ca^{2+} par exemple) comme les sols acides du nord est de la Thaïlande. Sans ces éléments qui assurent normalement la cohésion structurale, le sol se désagrège très facilement lorsqu'il subit une mise en solution, phénomène encore accentué par l'énergie cinétique de la pluie. Cette croûte, lorsqu'elle n'est pas fracturée (sol encore humide) peut diminuer d'un facteur dix la vitesse d'infiltration (Hoogmoed *et al.*, 1984 – Fohrer *et al.*, 1999). La faible cohésion structurale des sols est également responsable de la migration des particules d'argiles vers l'horizon de labour, pouvant diminuer également les vitesses de percolation d'un même facteur (Com. Pers. C. Hartmann). Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation, précédemment calculées sont donc divisées par dix. Les nouvelles valeurs obtenues pour les réservoirs "zone racinaire" et "nappe" sont respectivement égalées aux taux d'infiltration et de percolation maximaux. Le taux maximal de diffusion reste égal à la valeur de la conductivité hydraulique correspondant au réservoir "nappe" et sera éventuellement modifié pendant le calibrage du modèle.

IV-1-5. Les variables de forçages

IV-1-5-1. Les précipitations

Afin de restituer la variabilité des pluies de la région, des séries de mesures journalières enregistrées aux stations encadrant la zone étudiée sont utilisées par le modèle (Figure 1). Les hauteurs pluviométriques des deux stations les plus proches de la zone modélisée, qui sont aussi les stations les plus proches l'une de l'autre (7,5 km), sont assez bien corrélées au pas de temps journalier ($r = 0,78$). Par conséquent, la pluviosité sera considérée spatialement homogène sur l'ensemble de la surface modélisée (qui est bien plus réduite que le sous-bassin versant enquêté). A chaque pas de temps, si une pluie tombe, une hauteur d'eau correspondante est ajoutée aux réservoirs ouverts sur l'atmosphère : casiers, bassins et rivières. Pour les réservoirs « rivière » et « casier », cette hauteur est choisie égale à la pluviométrie journalière. Les bassins sont généralement conçus pour récupérer les eaux pluviales précipitées sur une surface maximale. Ils ont donc une aire de captage souvent supérieure à la surface du bassin. Dans son étude, Torri (1995) préconise un rapport de trois (surface de captage/surface du bassin) pour la construction de nouveaux bassins. Mes observations directes (Photographie 1) montrent que ce rapport est largement inférieur dans le sud de la province d'Ubon Ratchathani. En conséquence, un rapport de 1,5 est utilisé pour le modèle.

IV-1-5-2. L'évapotranspiration

La station météorologique de l'aéroport d'Ubon Ratchathani est la seule de la province à fournir des valeurs journalières d'évapotranspiration potentielle calculées, depuis 1966, à partir de la formule de Penman (ETP Penman). Les calculs d'évapotranspiration dans le modèle seront donc basés sur les données de cette station. A chaque pas de temps, une hauteur d'eau égale à l'ETP Penman journalière est soustraite aux volumes stockés dans les réservoirs à eau libre (casiers, bassins et rivières). Le réservoir « zone racinaire » est également soumis à l'évapotranspiration selon le processus représenté sur la figure 16.

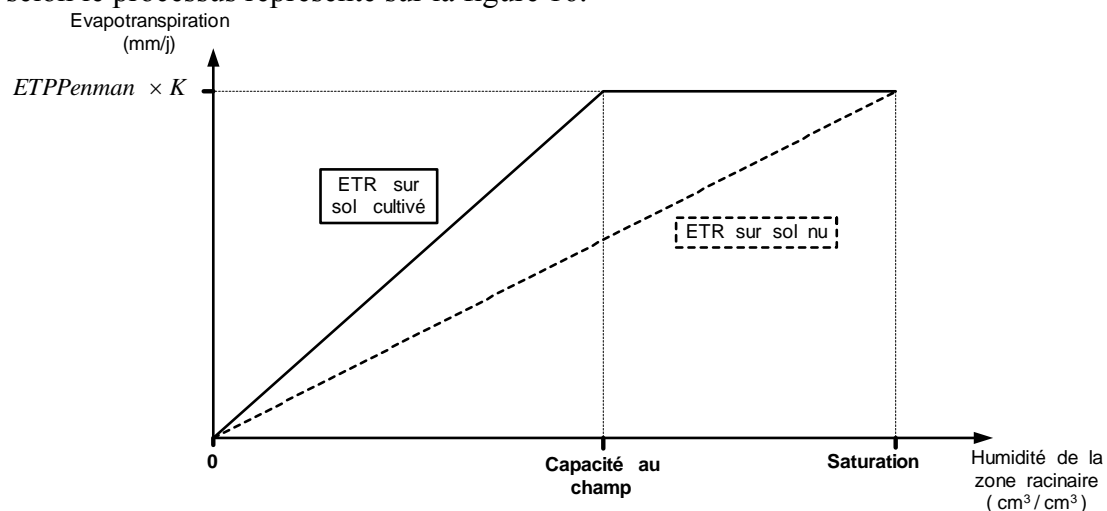


Figure 16. Evapotranspiration de la zone racinaire (en l'absence d'eau dans le casier).

K est le coefficient cultural des cultures représentées dans le modèle : pépinières de riz, riz repiqué, cultures maraîchères. Pour simplifier, il sera ici constant pour chacune des trois cultures et ne tiendra pas compte du stade de croissance et de développement de la plante. Il est fixé à 0,8 pour le riz repiqué (Kamoshita *et al.*, 2001 ; Jongdee *et al.*, 1995) et plus arbitrairement égal à 0,5 pour les pépinières. ETR, l'évapotranspiration réelle de la plante, est la hauteur (en mm), retranchée chaque jour à la hauteur d'eau totale du réservoir. Deux cas sont envisagés suivant que le sol est cultivé ou nu. Sur un sol nu, l'ETR, uniquement physique, est proportionnelle à l'humidité de la zone racinaire. Sur un sol cultivé, l'ETR est égale à $K \times ETP$, pour une humidité du sol supérieure à la capacité au champ. En-dessous de ce seuil, l'ETR diminue proportionnellement au taux d'humidité du sol, traduisant le stress hydrique subi par la plante. Dans ces deux cas, le potentiel hydrique du sol contrôlant directement l'évapotranspiration et l'humidité de la zone racinaire sont supposés varier linéairement. Devant cette approximation, il serait futile de considérer le seuil du point de flétrissement de la plante pour le calcul de l'ETR (d'autant plus difficile que nous avons affaire ici à des cultivars rizicoles de type traditionnels, à la physiologie mal connue, mais dotés d'une certaine résistance au stress hydrique pour des raisons encore méconnues des agronomes et des sélectionneurs !) L'évapotranspiration est donc calculée uniquement en fonction des variables pédoclimatiques et ne prend pas en compte les réactions physiologiques de la plante.

IV-1-6. Des fonctions « irrigation de complément » et « Evaluation du déficit hydrique » pour la représentation des usages.

Au stade actuel de développement du modèle, l'absence d'agents actifs (les paysans) oblige à prévoir les conditions d'irrigation dès l'initialisation. Bien qu'elles ne puissent pas dépendre, pour le moment, d'un choix pris par des agents interagissant entre eux et avec leur environnement au cours des simulations, ces conditions sont établies de façon à traduire le mieux possible les comportements réellement observés sur le terrain et permettre l'analyse de sensibilité de certains paramètres influant sur les conditions d'irrigation.

Une première représentation et étude de la partie usage du modèle consiste à analyser l'effet de l'irrigation d'appoint des pépinières sur la proportion de pépinières ayant subi un stress hydrique avant le repiquage, en partie responsable des chutes de rendement en fin de cycle cultural. A cet effet, deux fonctions sont créées, « irrigation de complément » et « Evaluation du déficit hydrique », et une période pour leur activation est déterminée. Quatre dates, fixées au 20 avril, 1^{er} juillet, 5 juin et 15 août sont choisies d'après le calendrier cultural établi pour la zone étudiée (Figure 9) et correspondent respectivement aux deux pics de semis et de repiquages.

Pendant toute la période avec présence de pépinières (20 avril au 15 août), la fonction « irrigation de complément » identifie, chaque jour, les pépinières dont le taux d'humidité de la zone racinaire est inférieure à la capacité au champ et suffisamment proches des points d'eau (distance maximale fixées par exemple à cinquante mètres conformément aux résultats d'enquêtes) puis les irriguent de manière à saturer leur zone racinaire et former une lame d'eau de cinq centimètres dans la pépinière (hauteur généralement observée lors de la deuxième sortie de terrain à la fin du mois d'avril).

Chaque jour, une seconde fonction « Evaluation du déficit hydrique » compte le nombre de pépinières dont le taux d'humidité de la zone racinaire est resté inférieur à la capacité au champ car elles étaient trop distantes des bassins ou rivières ou bien ces derniers avaient des volumes d'eau insuffisants. Rapporté au nombre total de pépinières cultivées pendant l'année, la valeur finale donnée par cette fonction permet de connaître la proportion de pépinières qui ont subi un déficit hydrique pendant l'année. Bien qu'elle ne repose que sur des propriétés hydrologiques, cette fonction sera utilisée pour évaluer l'efficacité de l'irrigation d'appoint dans la diminution du nombre de pépinières ayant subi un stress hydrique.

IV-2. Implémentation du modèle

IV-2-1. Diagramme UML du modèle

Pour permettre une construction informatique rigoureuse du modèle, une première phase consiste à organiser schématiquement les différents éléments structurant le modèle en indiquant le type de relations qui les lient. Plusieurs langages de représentation, codifiés et normés, existent. L'UML (Unified Modelling Language) est un langage de représentation appliqué à la programmation Orientée Objet (Rumbauch *et al.*, 1997). Il permet de visualiser, grâce à des diagrammes, les différentes entités du modèle et leur hiérarchisation. Le diagramme de classes représente chaque objet du modèle, avec leur relations, sous forme de classes ayant chacune leurs attributs et leurs méthodes. Un tel diagramme a été tracé pour le modèle « Lam Dom Yaï » construit pendant le stage (Figure 17).

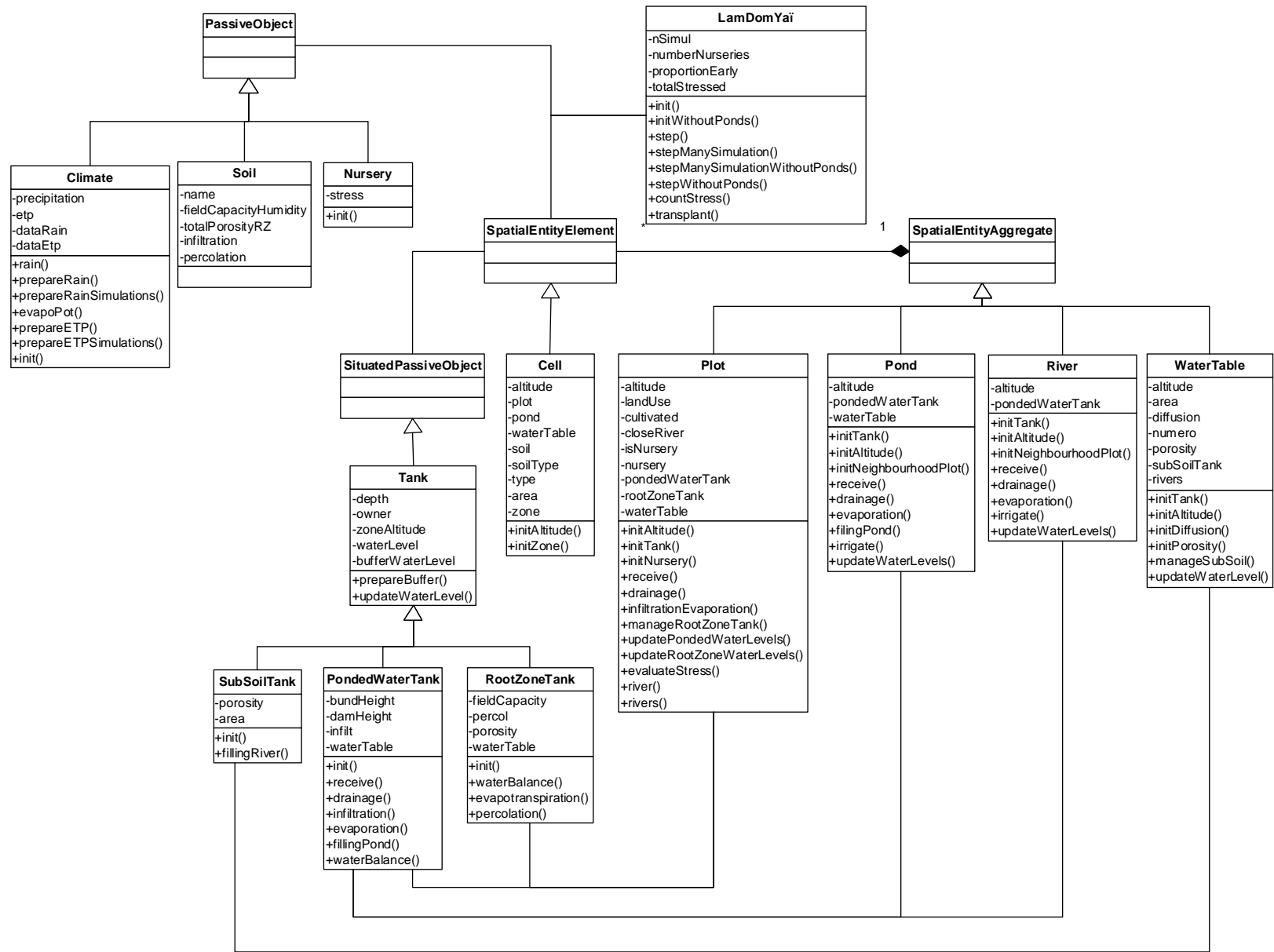


Figure 17. Diagramme UML du modèle Lam Dom Yaï.

IV-2-2. Cormas

En I-3-2, nous avons avancé des arguments sur le choix des systèmes multi-agents. Le modèle que nous construisons ici n'est pas vraiment multi-agent. Mais il constitue le modèle biophysique de ce qui pourra devenir un SMA croisant des dynamiques hydrologiques et des décisions d'acteurs. La plateforme CORMAS (Bousquet *et al.*, 1998) offre cette possibilité d'une implémentation du modèle biophysique. Plusieurs plateformes de simulation utilisant les SMA existent. CORMAS semble convenir particulièrement bien car elle permet de spatialiser les entités du modèle dans un espace métré. Son architecture prédéfinie et organisée en entités spatiales et passives (les entités sociales ne sont pas utilisées pour le moment) offre des possibilités intéressantes pour agencer dans l'espace les différents éléments du modèle, définir des relations d'inclusion et de voisinage dont le rôle est très important dans notre modèle. Il offre enfin de grandes potentialités pour le développement de la partie usage de l'eau grâce à l'utilisation des entités sociales qui permettent de représenter des agents actifs doués d'une autonomie de prise de décision, pouvant interagir directement entre eux ou via l'exploitation des ressources d'un espace commun. Cormas utilise le langage de programmation Small Talk sous l'environnement Visual-Works. Bien qu'il offre au modélisateur une architecture prédéfinie, adaptée à la représentation d'agents, la programmation des entités qui composent le modèle, leur organisation et leur fonctionnement sont, bien entendu, laissées au soin du modélisateur. Cormas dispose d'une interface qui s'organise selon trois module (Figure 18).

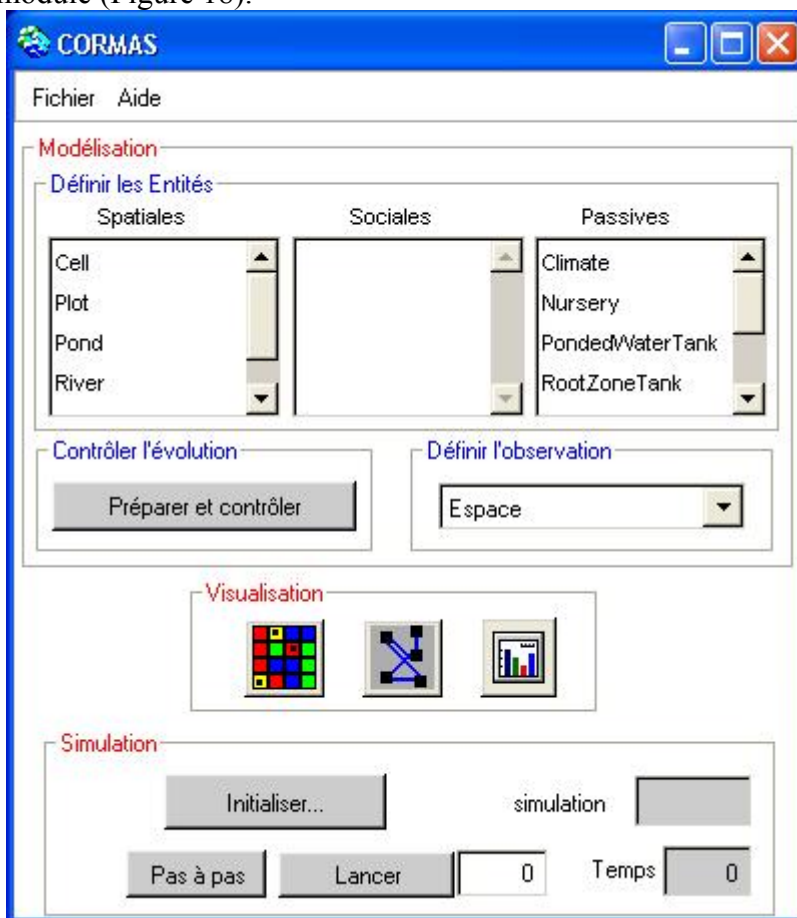


Figure 18. Interface principale de Cormas.

Un premier module permet de définir les entités du modèle avec leurs règles d'action. Un second module, « chef d'orchestre du modèle », permet d'ordonner les opérations que l'on souhaite voir effectuées à chaque pas de temps. Un troisième module permet d'observer le déroulement et le résultat des simulations sous différents points de vue choisis par le modélisateur. Ce dernier module comporte notamment une grille sur laquelle l'ensemble des entités du modèle est spatialement référencé.

IV-2-3. Spatialisation des agents du modèle

Le passage de la conceptualisation à l'implémentation nécessite de définir de nouvelles dimensions aux objets du modèle, exprimées dans l'unité métrique de la grille de Cormas. Cette grille se divise en cellules, unités spatiales élémentaires déterminant la taille minimale des unités fonctionnelles spatialisées. Les réservoirs représentés (« casier », « zone racinaire », « bassin », « nappe » et « rivière »), unités fonctionnelles du modèle, sont de tailles différentes. Une solution consiste donc à les associer à des agrégats, composés d'un nombre variable de cellules, proportionnels à leur taille réelle. A l'intérieur de chaque agrégat, les cellules sont « fusionnées » en une seule unité fonctionnelle. Les différents agrégats se superposent en plusieurs couches, conformément à la structure conceptualisée (figures 10, 11 et 12). La surface représentée par une cellule doit être fixée afin de déterminer le nombre de cellules de la grille et de chaque agrégat. Nous optons finalement pour une grille de 5000 cellules à cinquante lignes et cent colonnes. Chaque cellule représente un carré de cent mètres de côté formant ainsi une surface totale de cinquante hectares. Le nombre de cellules pour chaque agrégat peut alors être défini en fonction des dimensions réelles de l'objet qu'il représente :

- Trois agrégats de 33×25 cellules et trois agrégats de 33×24 cellules associés aux 6 réservoirs « nappe » (Figure 19),
- Trois agrégats de 33×1 cellules associés aux trois réservoirs de la rivière Huay Bua, et un agrégat de 1×50 cellules associé au réservoir de la rivière Lam Dom Yaï (Figure 20),
- 625 agrégats formant les 625 parcelles de la zone modélisée, (Figure 21), contenant chacun un réservoir « casier » et un réservoir « zone racinaire » composés de une à seize cellules.
- Quinze agrégats bassins comportant entre deux et huit cellules contenant chacun un réservoir « bassin » (Figure 22).

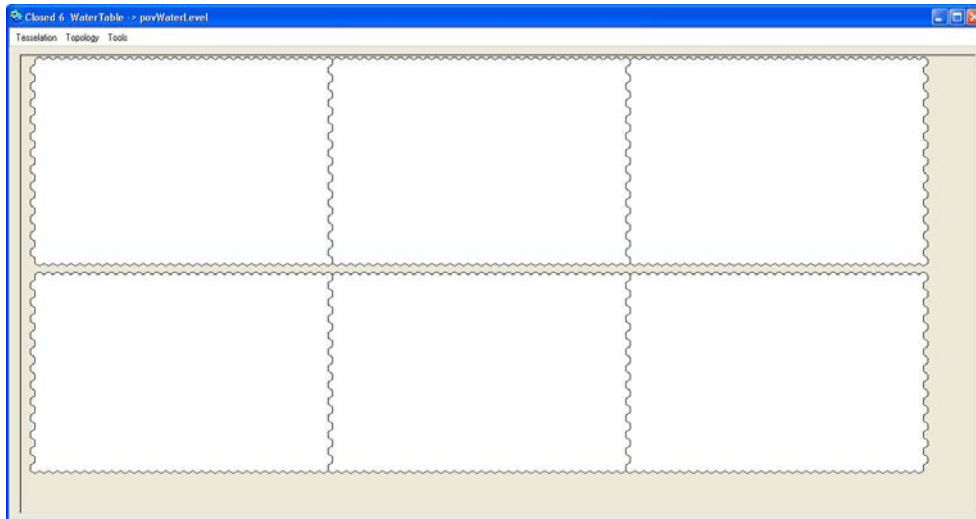


Figure 19. Les six réservoirs « nappe ».

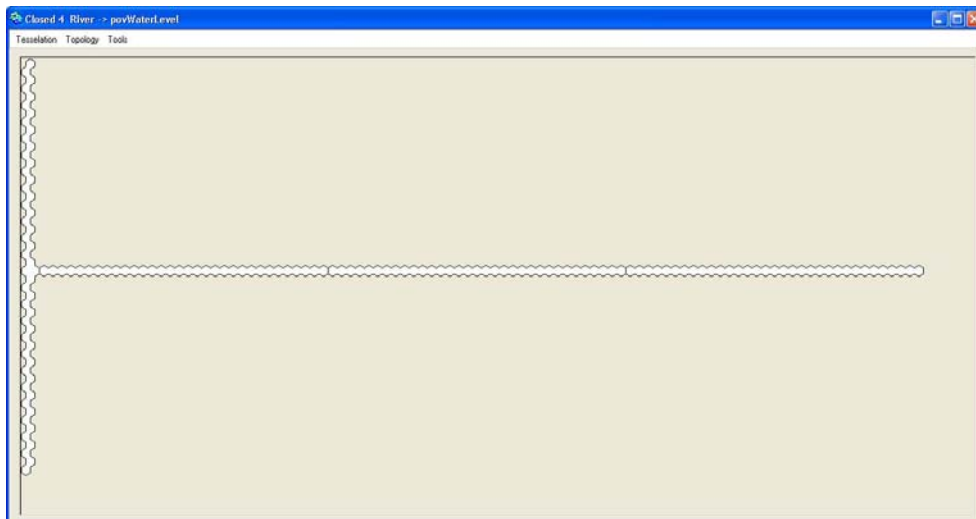


Figure 20. Les quatre réservoirs « rivière »

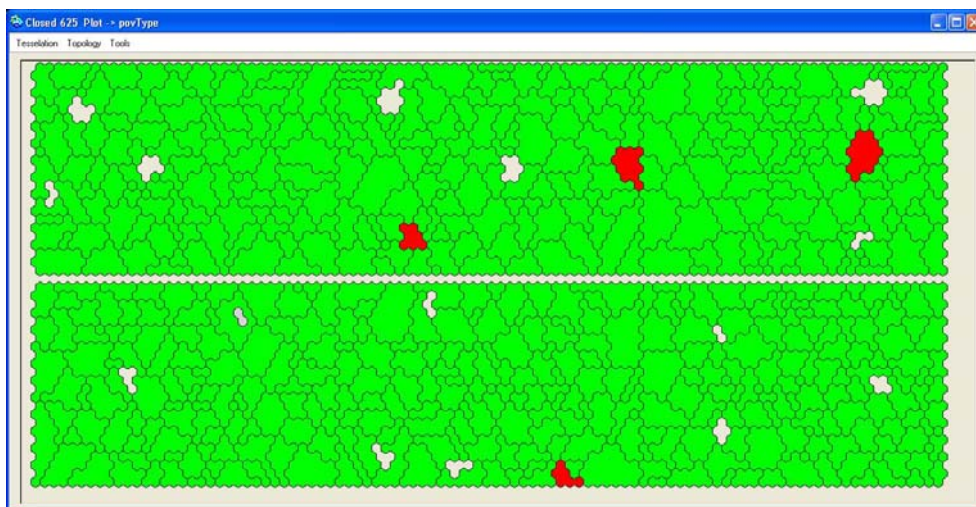


Figure 21. Les 625 parcelles, en vert, rizicole, en rouge, maraîchères. (Les bassins en blanc, Figure 22)

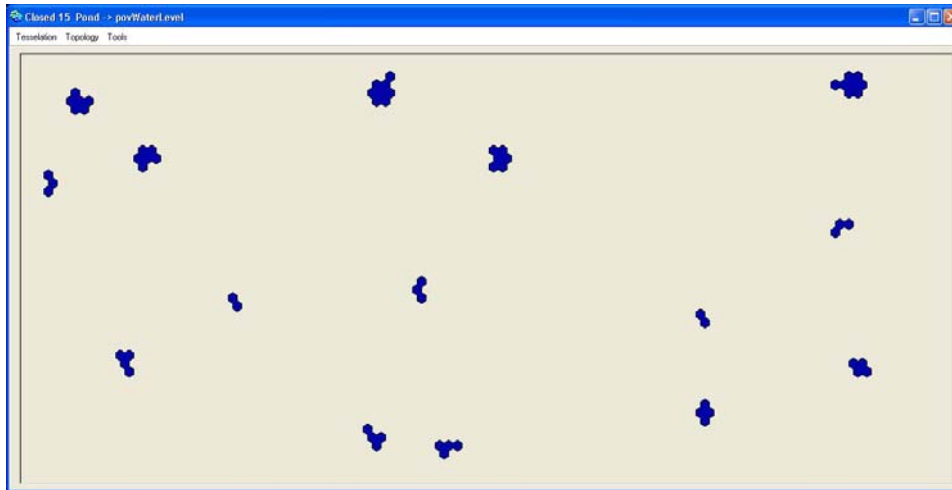


Figure 22. Les quinze bassins

Le processus informatique de génération des parcelles et des bassins lors de l'initialisation du modèle repose sur la méthode « de la croissance de graines » initialement dispersées sur la grille. Ceci peut aboutir à des formes parfois étranges (Figure 22), sans conséquences sur les processus hydrologiques modélisés.

Chaque cellule a plusieurs attributs : un attribut « altitude » qui représente la surface du sol, variant de 129 m à 133 mètres d'ouest en est et selon un gradient croissant de 0,4% de la rivière Huay Bua vers les limites nord et sud de la grille, formant ainsi une vallée, et un attribut sol faisant correspondre à chaque cellule l'une des six séries de sol présentes dans la zone modélisée (Figure 23).

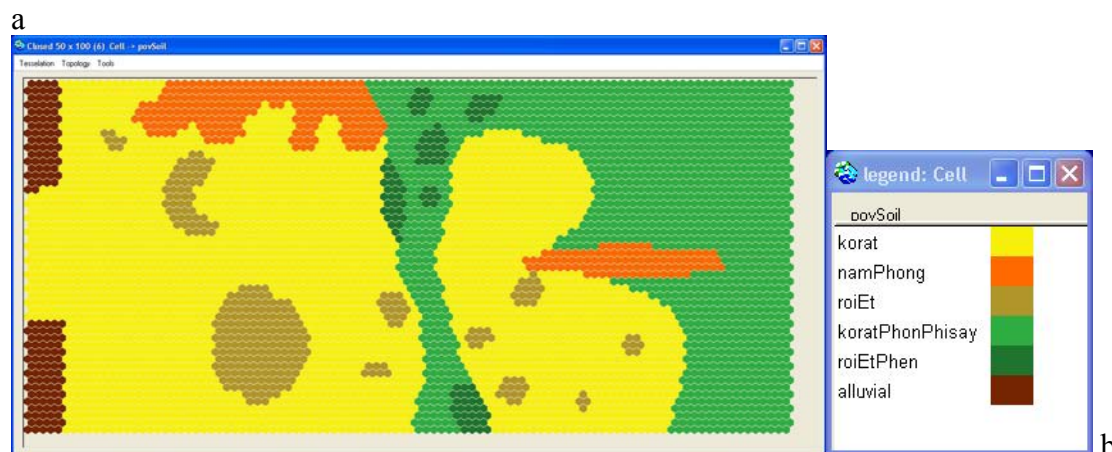


Figure 23.
a) les 6 séries de sols,
b) légende.

La répartition des séries de sols sur l'espace modélisé est choisie de manière à respecter leur distribution réelle (Carte 7).

Le modèle dispose ainsi des éléments jugés primordiaux pour représenter la dynamique de la ressource.

IV-2-4. Vérification du modèle

Après son implémentation, une première étape consiste à vérifier si le modèle fonctionne conformément aux objectifs fixés lors de sa conceptualisation. Cette étape consiste à observer l'évolution des différents paramètres du modèle, juger de l'adéquation entre leur comportement et ce que l'on souhaiterait obtenir. Une méthode proposée ici consiste à définir des conditions initiales particulières, correspondant à des situations simples dont l'évolution dans le temps est intuitivement prévisible. Les paramètres sélectionnés pour cette vérification doivent permettre d'observer le fonctionnement des différents réservoirs représenté par les variations de volumes d'eau dans chacun d'entre eux et les quantités d'eau échangés au cours du temps.

IV-2-4-1. Fonctionnement des parcelles

Scénario 1

Une première vérification consiste à observer un casier initialement rempli d'eau se vider dans sa zone racinaire initialement sèche avec une profondeur de nappe assez importante pour ne pas perturber la percolation. Dans ce scénario, les fonctions « précipitation » et « évapotranspiration » sont désactivées pour mieux observer l'effet des transferts « infiltration » et « percolation » sur les niveaux d'eau dans les deux réservoirs. Le niveau d'eau dans le réservoir « zone racinaire » représente son taux d'humidité : lorsque le niveau est maximal (300 mm, égal à la hauteur de la zone racinaire) le sol est saturé en eau, lorsqu'il est nul, le sol est sec. Il existe un niveau correspondant à un taux d'humidité égal à la capacité au champ. Il représente la hauteur d'une lame d'eau de volume équivalent à la quantité d'eau dans le réservoir.

L'observation est répétée plusieurs fois, sur des parcelles aux taux d'infiltration et de percolation maximales différents (en fonction des types de sol). Sur l'ensemble des graphiques représentés sur les figures 24, 25, 26, l'unité de l'axe des abscisses est le jour, l'unité de l'axe des ordonnées est le millimètre pour les niveaux d'eau dans les réservoirs et le millimètre/jour pour les transferts d'eau entre les réservoirs. Sur l'axe des abscisses, le premier segment correspond au pas de temps 0 et indique les niveaux d'eau et les taux d'infiltration et de percolation initiaux.

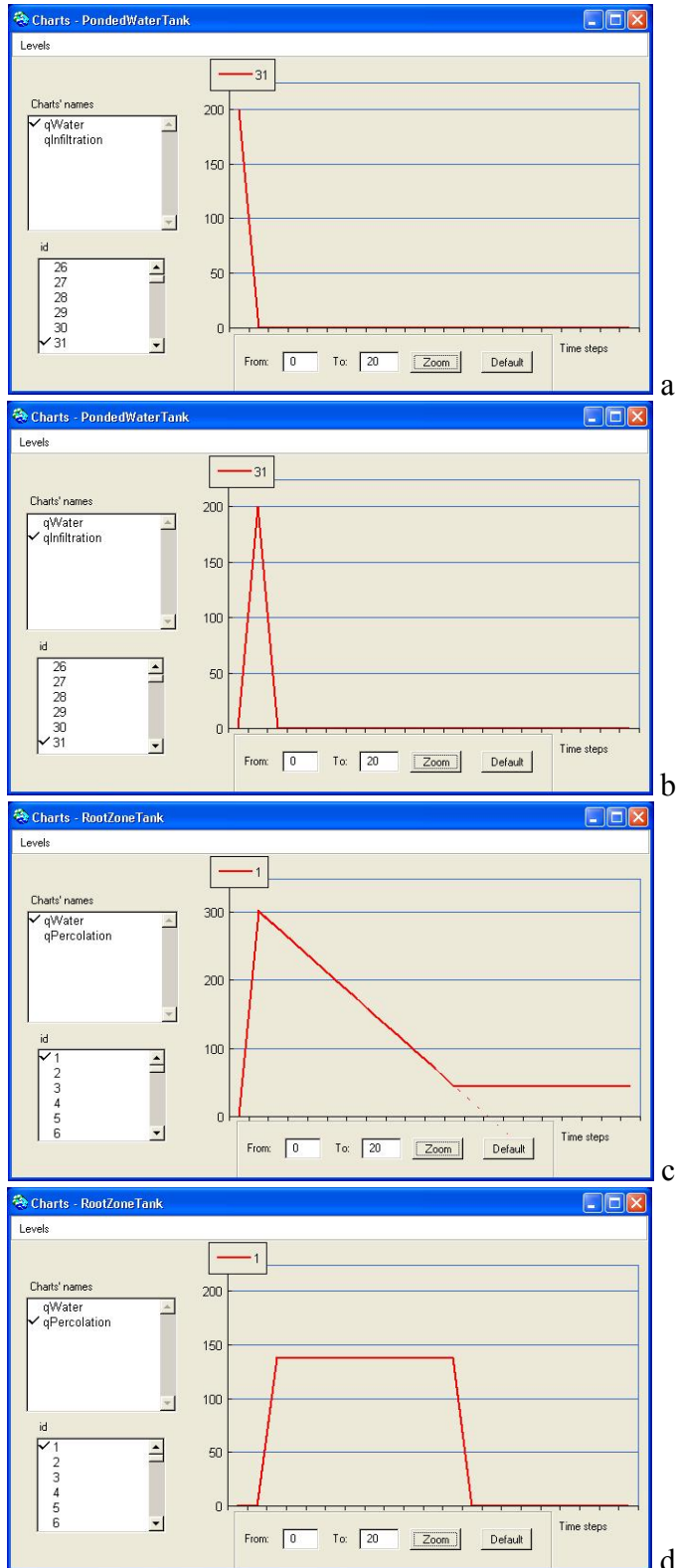
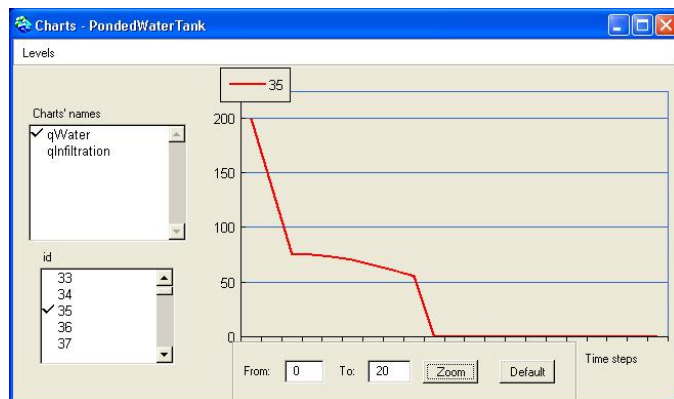
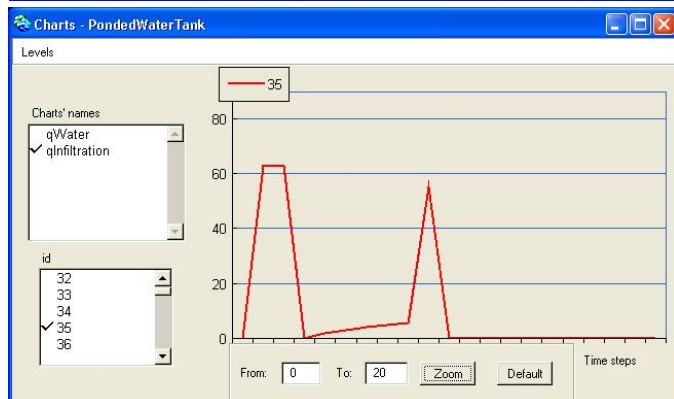


Figure 24. Dynamique de l'eau dans la parcelle.
 a) Niveau d'eau dans le casier
 b) Taux d'infiltration de l'eau du casier vers la zone racinaire
 c) Niveau d'eau dans la zone racinaire
 d) Taux de percolation de la zone racinaire vers la nappe

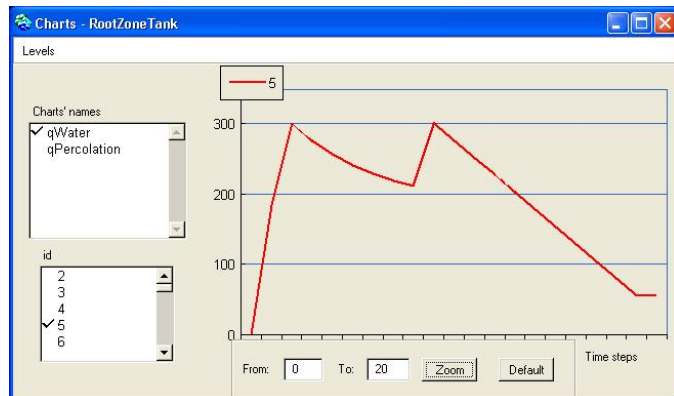
La figure 24 montre qu'il suffit d'une seule journée pour que le casier initialement plein (hauteur d'eau égale à 200 mm, correspondant à la hauteur des diguettes) se vide entièrement dans la zone racinaire sèche. L'infiltration, initialement nulle, est maximale dès le premier pas de temps puis devient nulle au second quand il n'y a plus d'eau dans le casier. La quantité d'eau dans le réservoir « zone racinaire » initialement nulle augmente brutalement en raison de l'infiltration puis diminue linéairement à cause d'un taux de percolation constant. Quand le niveau d'eau dans le réservoir « zone racinaire » atteint la capacité au champ, la percolation cesse et le niveau devient constant.



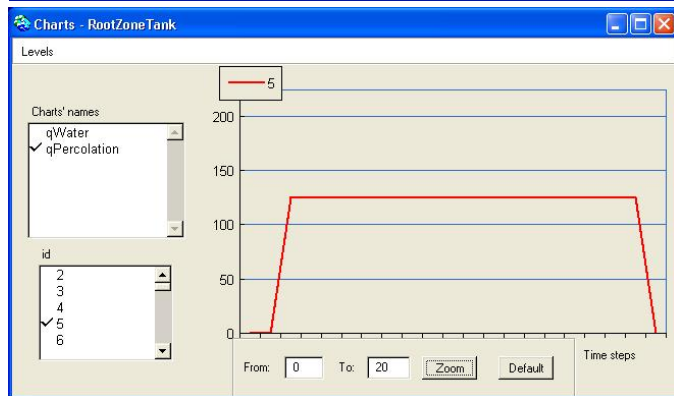
a



b



c



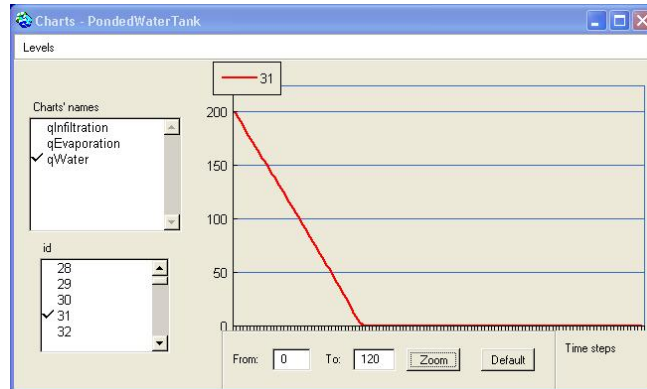
d

Figure 25. Dynamique de l'eau dans la parcelle.

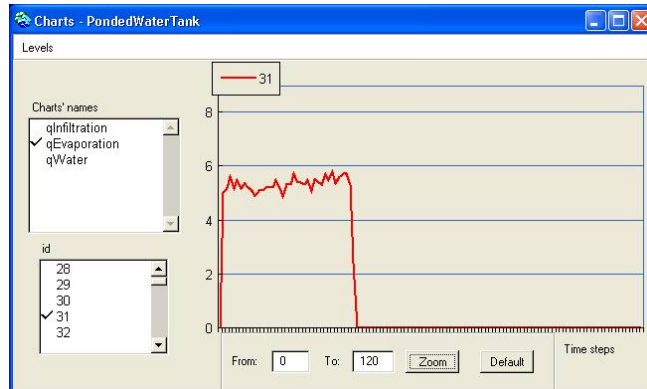
- a) Niveau d'eau dans le casier
- b) Taux d'infiltration de l'eau du casier vers la zone racinaire
- c) Niveau d'eau dans la zone racinaire
- d) Taux de percolation de la zone racinaire vers la nappe

L'expérience est renouvelée pour une autre parcelle (Figure 25) caractérisée par un taux d'infiltration maximal beaucoup plus faible que la première et un taux de percolation légèrement inférieur. Les variations observées sont différentes mais toujours explicables et logiques. Le casier n'est pas encore vide lorsque l'humidité de la zone racinaire atteint la saturation. Ceci provoque un arrêt momentané de l'infiltration qui reprend lorsque la zone racinaire se vidange par percolation. Un deuxième pic d'infiltration a lieu lorsque l'humidité de la zone racinaire repasse en dessous du seuil de la fonction infiltration (Figure 14).

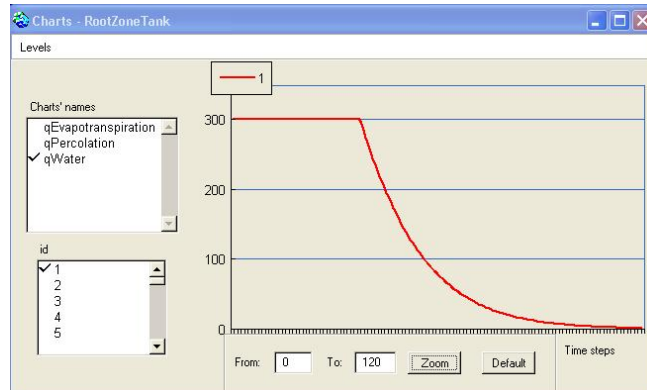
Après cette première phase de vérification, les valeurs 0,1 et 200 sont respectivement attribuées aux coefficients a et b déterminant les seuils pour le calcul des taux d'infiltration et de percolation (Figures 14 et 15). Ils sont choisis de telle manière à éviter les phénomènes décrits précédemment (oscillations artificielles des niveaux d'eau pouvant dépasser la hauteur des réservoirs, ou équilibres dynamiques empêchant le remplissage total d'un réservoir).



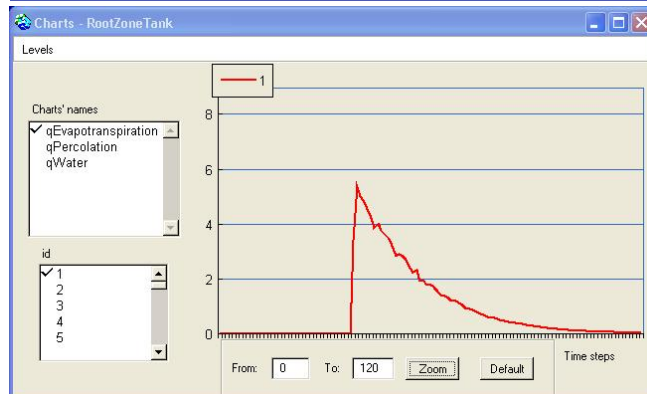
a



b



c



d

Figure 26. Dynamique de l'eau dans la parcelle non cultivée sujette à l'évaporation

- a) Niveau d'eau dans le casier
- b) Taux d'évaporation du casier
- c) Niveau d'eau dans la zone racinaire
- d) Taux d'évapotranspiration de la zone racinaire

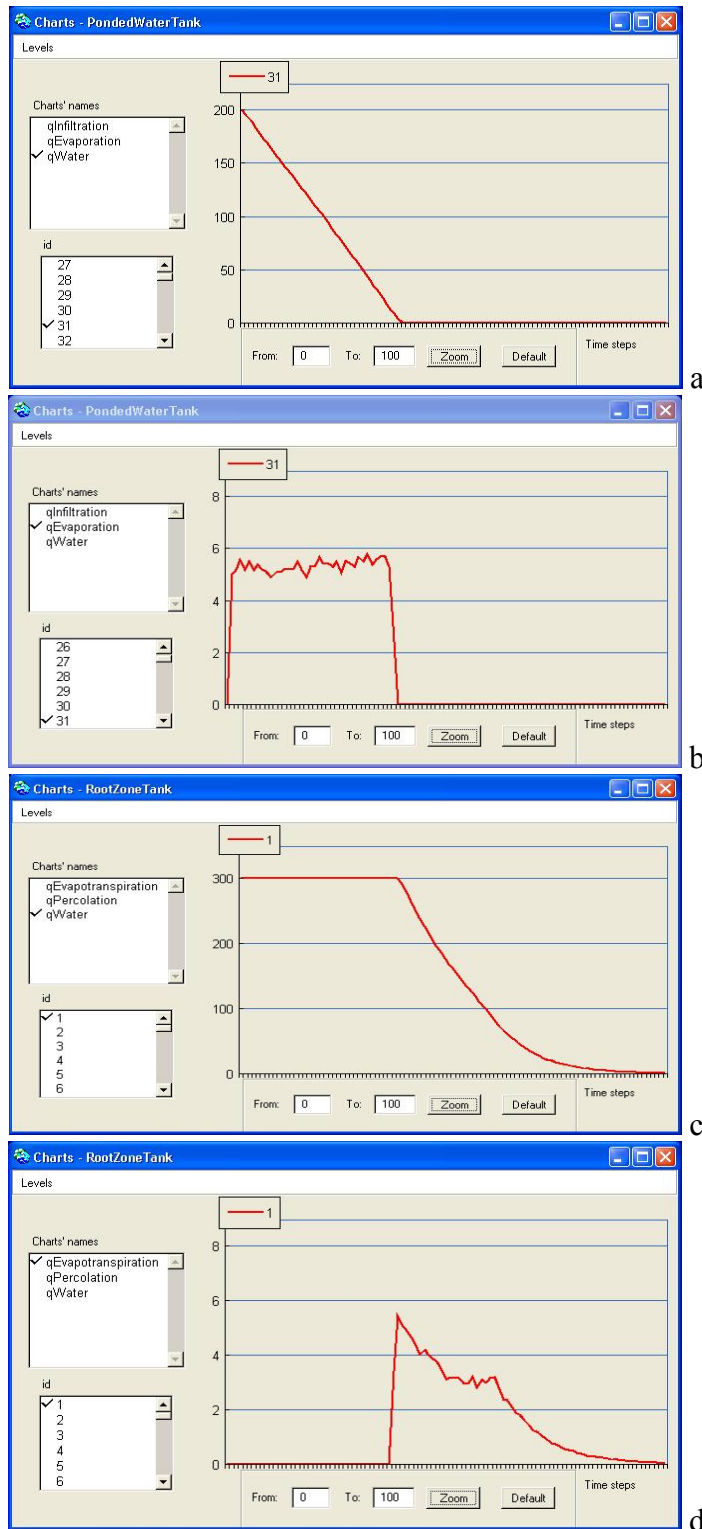


Figure 27. Dynamique de l'eau dans la parcelle cultivée soumise à l'évapotranspiration
a) Niveau d'eau dans le casier
b) Taux d'évaporation du casier
c) Niveau d'eau dans la zone racinaire
d) Taux d'évapotranspiration de la zone racinaire

Scénario 2 :

Effet de l'évapotranspiration sur une parcelle initialement saturée en eau (réservoirs « casier » et « zone racinaire » totalement remplis), avec un taux de percolation nul pendant toute la simulation. Deux cas sont étudiés suivant que la parcelle est cultivée ou non.

Sur un sol non cultivé (Figure 26) : le niveau d'eau dans le casier décroît sous l'effet de la seule évaporation égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP). La décroissance est quasiment linéaire du fait de la relative stabilité de l'ETP. Tant qu'il y a de l'eau dans le casier, la zone racinaire est toujours saturée et ne subit aucune perte par évaporation. Dès que le casier est vide, le niveau d'eau dans la zone racinaire diminue d'autant plus lentement que l'évaporation, proportionnelle à l'humidité du sol, devient faible.

Sur sol cultivé (Figure 27) : le casier fonctionne de la même façon que dans le cas d'un sol nu et il n'y a pas d'évapotranspiration de l'eau de la zone racinaire tant que la demande climatique est entièrement satisfaite par l'évaporation de la lame d'eau superficielle. Contrairement au cas du sol nu, un palier apparaît dans la décroissance du taux d'évapotranspiration de la zone racinaire au cours du temps : lorsque l'évaporation physique du sol devient faible en raison d'une diminution de son taux d'humidité, la transpiration de la plante maintient l'évapotranspiration à un taux égal à $K \times ETP$ (K étant le coefficient cultural). Quand l'humidité de la zone racinaire descend en dessous de la capacité au champ, l'évapotranspiration décroît linéairement en fonction du taux d'humidité.

Scénario 3 (Figure 28)

Réservoir « zone racinaire » initialement rempli et simultanément soumis aux effets de l'évapotranspiration et de la percolation. Les réservoirs « nappe » et « casier » sont initialement vides afin de ne pas compliquer l'observation des transferts.

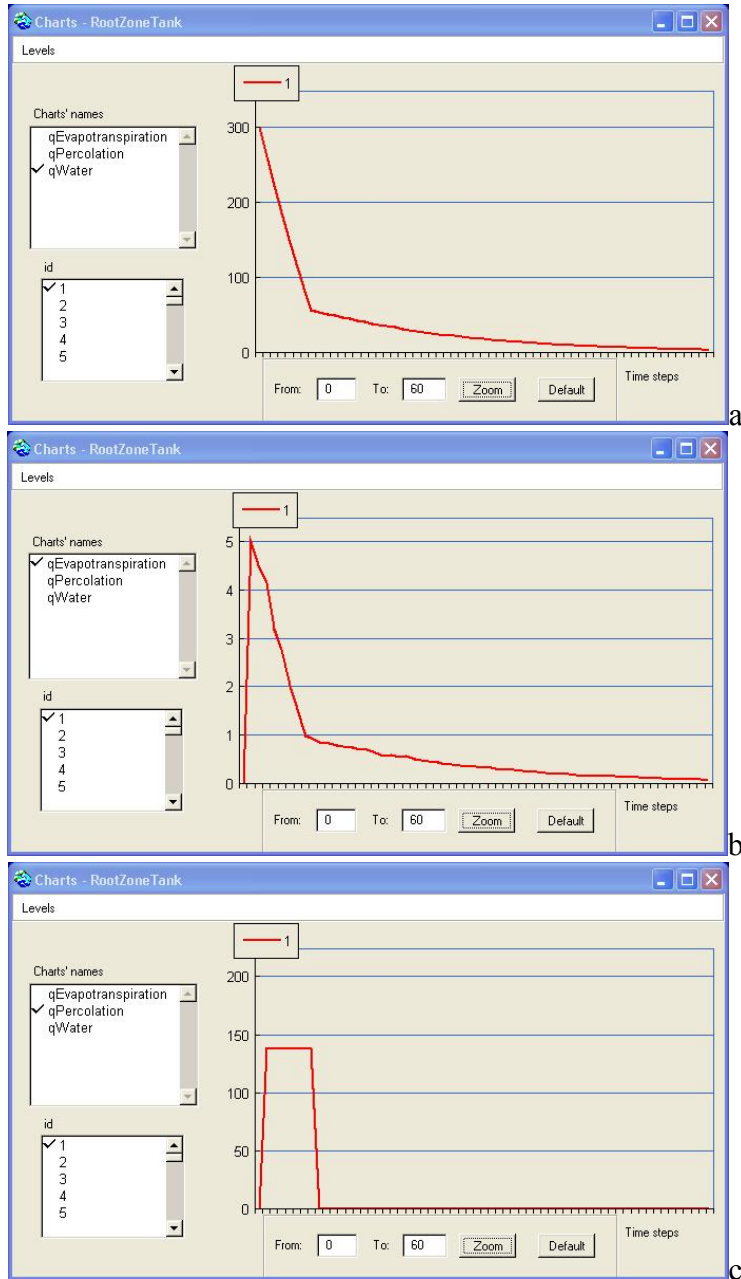


Figure 28. Variation du niveau de l'eau dans un réservoir « zone racinaire » simultanément soumis à l'évapotranspiration et à la percolation.

- a) Niveau d'eau dans la zone racinaire
- b) Taux d'évapotranspiration
- c) Taux de percolation

La zone racinaire commence par se vider très rapidement, sous l'effet de la percolation qui est alors maximale. Dès que l'humidité de la zone racinaire atteint la capacité au champ, la percolation cesse et la zone racinaire continue à se vider sous le seul effet de l'évapotranspiration.

IV-2-4-2. Fonctionnement des bassins

Dans les scénarios qui suivent (1 et 2), les valeurs pour les précipitation et évapotranspiration sont nulles.

Scénario 1

Vidange des bassins initialement remplis dans un réservoir « nappe » vide (Figure 29).

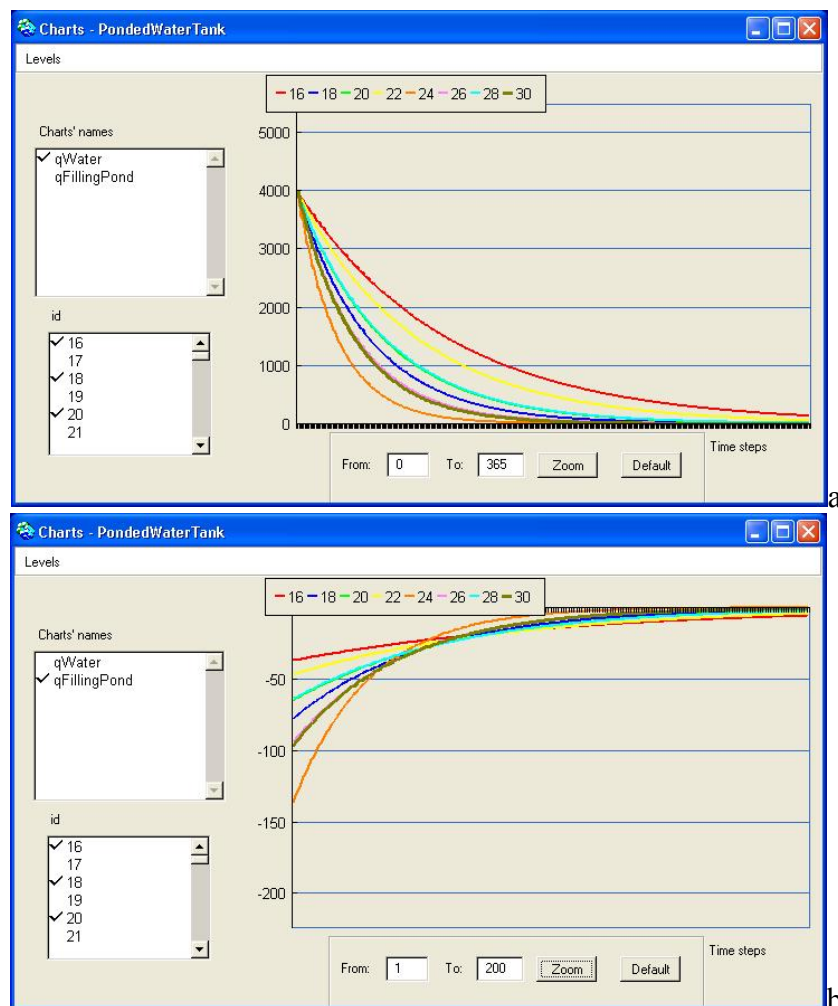


Figure 29. Vidange des bassins dans un réservoir « nappe » vide.
a) Niveau d'eau dans 8 des 15 bassins
b) Taux de diffusion de l'eau dans 8 des 15 bassins.

En tout début de simulation, la surface d'échange entre les bassins et les réservoirs « nappe » est maximale. Les bassins se vident donc rapidement. Au cours

de leur vidange, la pression hydrostatique diminue ainsi que la diffusion. Les valeurs pour les diffusions sont négatives compte tenu des normes fixées dans le modèle.

Scénario 2

Remplissage de bassins initialement vides dans un sol saturé (réservoir « nappe » plein) (Figure 30).

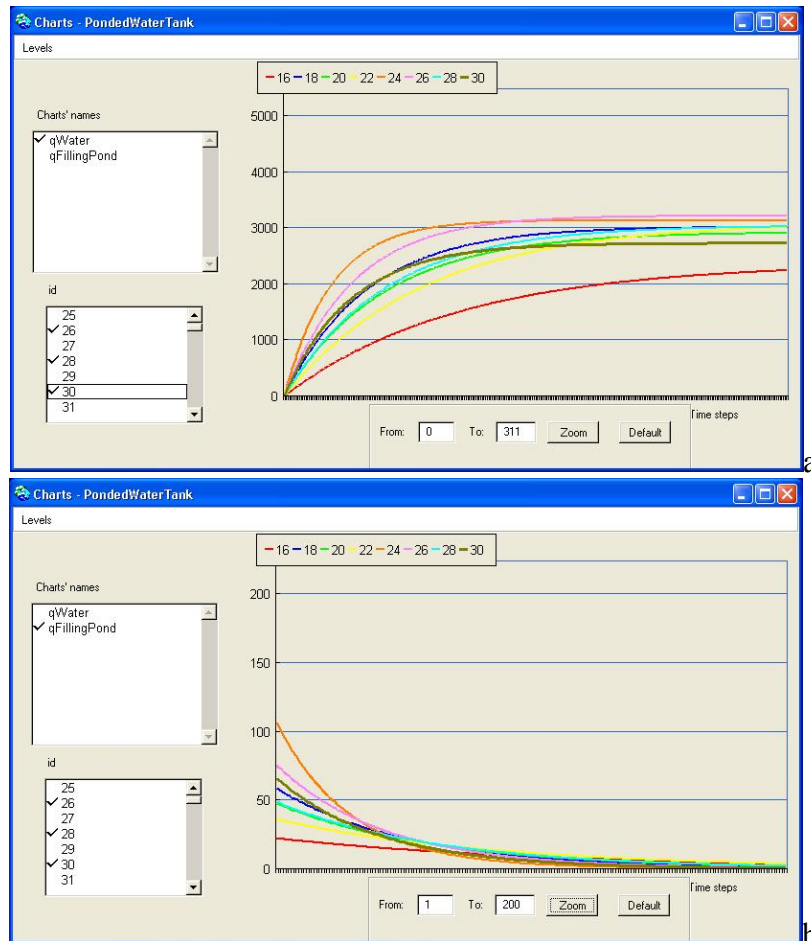


Figure 30. Remplissage des bassins à partir d'un sol saturé (réservoir « nappe » plein).

- a) Niveau d'eau dans 8 des 15 bassins
- b) Taux de diffusion de l'eau dans 8 des 15 bassins.

Comme pour le cas précédent, le taux de diffusion est maximal (positif cette fois ci) en début de simulation lorsque la surface d'échange entre les réservoirs « bassins » et « nappe » est maximale puis il diminue avec le remplissage des bassins.

Ces deux expériences montrent que les vitesses de remplissage ou de vidange ne sont pas les mêmes pour les différents bassins, traduisant la diversité des sols. Dans le cas du remplissage, les niveaux d'eau maximaux atteints en fin de simulation sont également différents : ils dépendent de la position du bassin sur la toposéquence (cf. la différence entre les altitudes 1 et 2 représentées sur la figure 12b)

IV-2-4-3. Fonctionnement des nappes et rivières

L'expérience consiste à observer la variation de niveau dans le réservoir médian de la rivière Huay Bua (cf. schéma ci-dessous) et des différents transferts impliqués (drainage et diffusion).

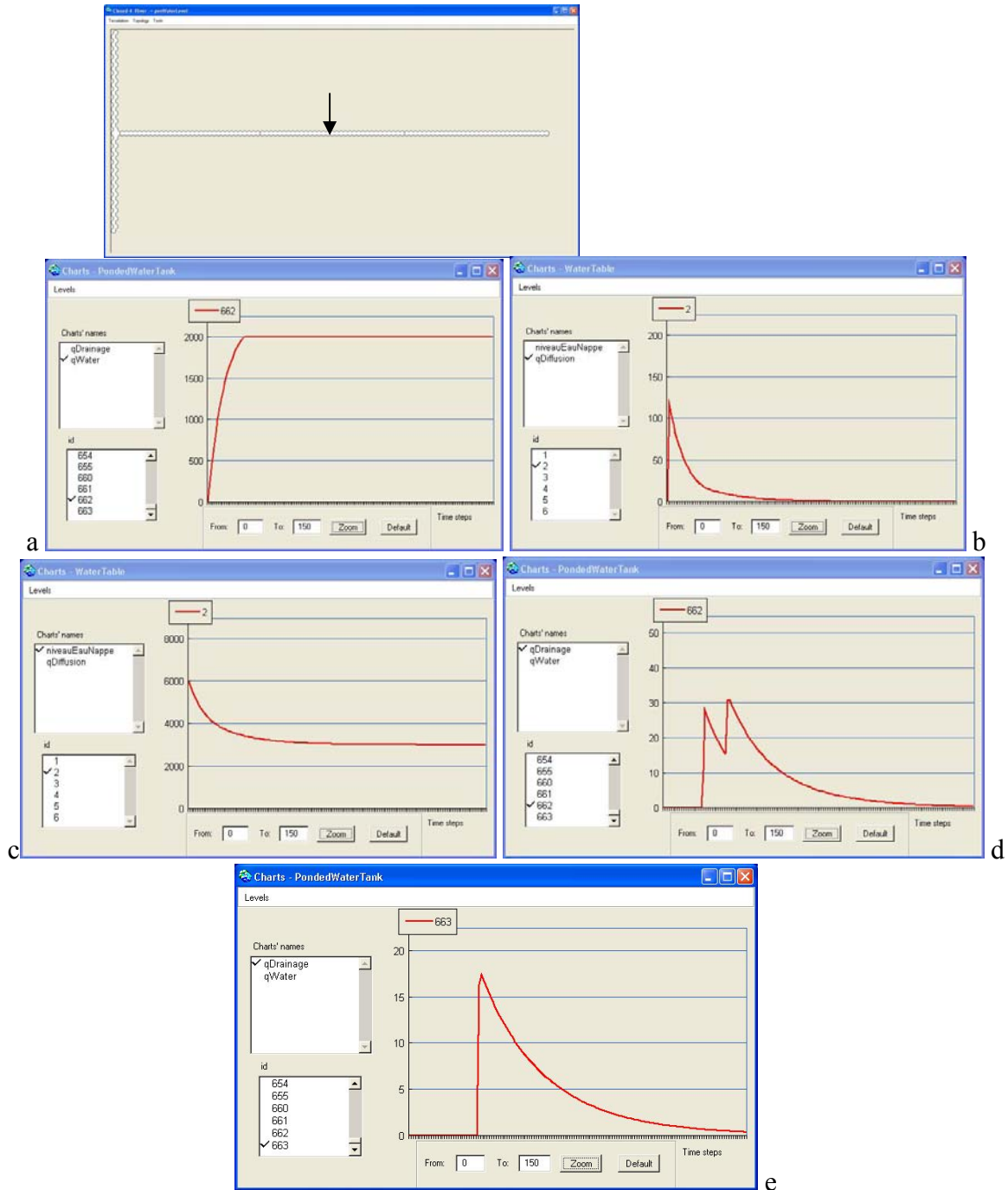


Figure 31. Dynamiques Nappe-Rivière.

- Niveau de l'eau dans le réservoir médian de la rivière Huay Bua,
- Diffusion entre le réservoir « rivière » et le réservoir « nappe » nord,
- Niveau de l'eau dans le réservoir « nappe » nord,
- Drainage du réservoir « rivière » médian de la rivière Huay Bua dans le réservoir « rivière » en aval,
- Drainage du réservoir « rivière » de la Huay Bua le plus en amont dans le réservoir médian.

La rivière est initialement vide et les réservoirs « nappe » totalement remplis. Un seul des réservoirs « nappe » encadrant le réservoir médian de la rivière Huay Bua est représenté sur la figure 31 car ces deux réservoirs ont un fonctionnement analogue. Les précipitations et l'évapotranspiration sont nuls tout au long de la simulation. La rivière se remplit par drainage des eaux de la nappe dont le niveau baisse par conséquent. Comme dans le cas des bassins et pour les mêmes raisons, la diffusion de l'eau de la nappe vers la rivière est maximale en début de simulation. Quand le niveau de la rivière atteint la hauteur du seuil, il se stabilise et le drainage commence (Figure 31d). Maximal au début, il diminue car l'alimentation en eau de la rivière par diffusion des nappes diminue également (Figure 31b). A cette période, le niveau de l'eau dans le réservoir le plus en amont de la rivière Huay Bua n'a pas encore atteint la hauteur du seuil car les réservoirs « nappe » qui l'encadrent diffusent plus lentement dans la rivière : dans cette partie orientale de la zone modélisée, les sols sont moins perméables (Figure 23 : la série de sol Korat-Phon-Phisay a une conductivité hydraulique moyenne, 620 mm/j, inférieure à la série de sol Korat : 1160 mm/j). Lorsque le niveau de l'eau dans le réservoir le plus amont de la rivière Huay Bua atteint finalement la hauteur du seuil, le drainage commence (Figure 31e) et provoque une augmentation du drainage (identique au débit dans le cas de la rivière) du réservoir médian de la rivière Huay Bua dans le réservoir en aval. (cf. second pic de la figure 31d). En fin de simulation, les niveaux de la nappe et de la rivière se stabilisent à une même hauteur imposée par la hauteur du seuil (Figures 31 a et c). Il est important de noter que les hauteurs représentées ne sont pas identiques car la profondeur du réservoir « nappe » dépasse d'un mètre celle du réservoir « rivière » (Figure 11b).

IV-2-4-4. Vérification des fonctions « irrigation de complément » et « Evaluation du déficit hydrique »

Fonction « irrigation de complément »

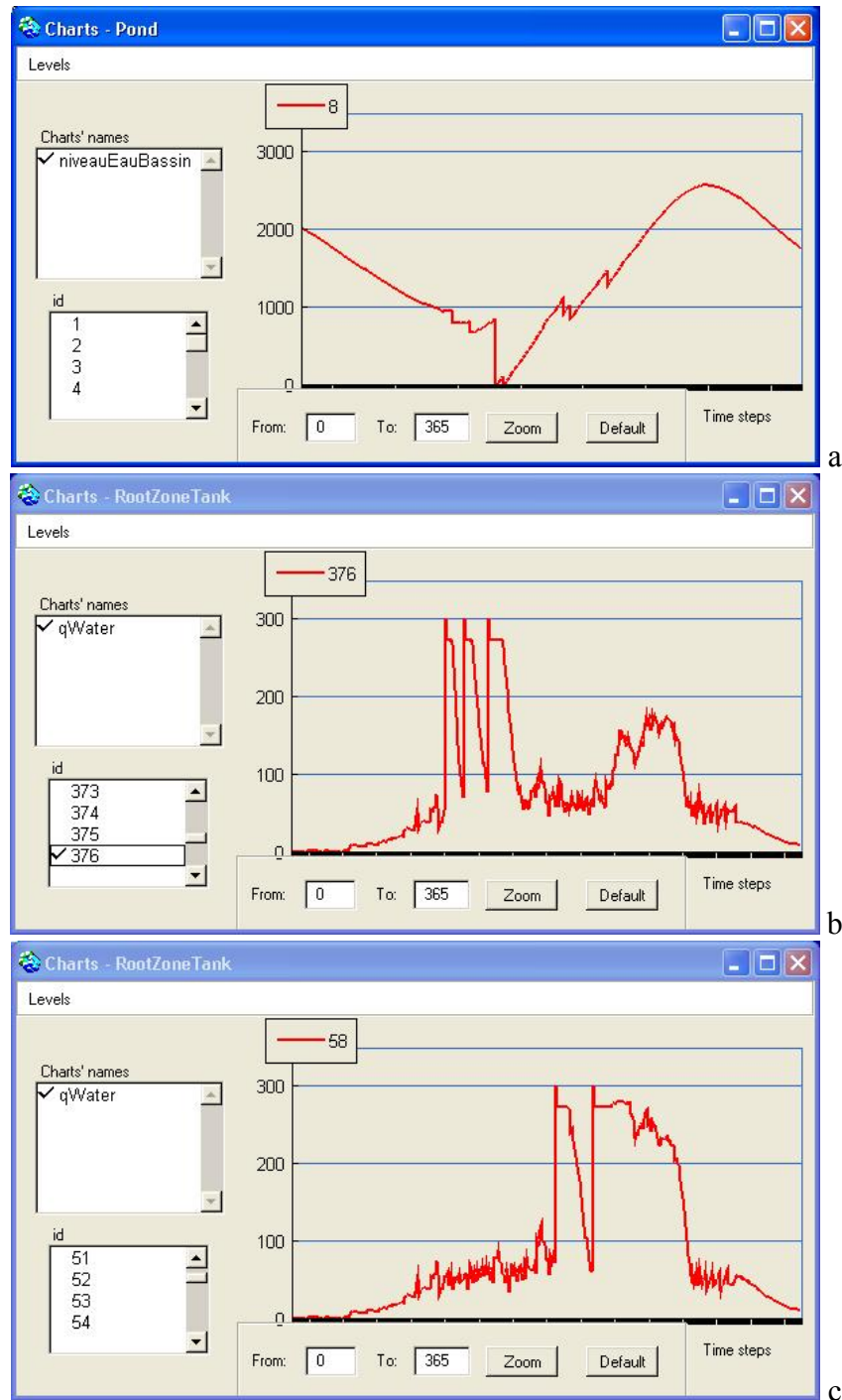


Figure 32. Transferts d'eau entre un bassin et les pépinières qu'il irrigue
a) Niveau d'eau dans le bassin n° 8
b) Niveau d'eau dans une pépinière semée le 20 avril (semis précoce), irriguée par le bassin n° 8
c) Niveau d'eau dans une pépinière semée le 1^{er} juillet (semis tardif), irriguée par le bassin n° 8

La figure 32 illustre parfaitement l'effet des deux vagues d'irrigation, correspondant aux deux pics de semis (b et c), sur les variations du niveau d'eau dans le bassin (a) et la zone racinaire des pépinières. A chaque irrigation, l'humidité de la zone racinaire est amenée à la saturation, et l'on observe bien qu'une irrigation n'a lieu que lorsque l'humidité de la zone racinaire descend en dessous de la capacité au champ, correspondant à une lame d'eau de soixante millimètres. La figure 32a montre que les quantités d'eau prélevées dans le bassin pendant la deuxième vague d'irrigation sont moins importantes que lors de la première, ce qui s'explique par le nombre plus faible de pépinières en déficit hydrique au mois de juillet.

Fonction « Evaluation du déficit hydrique »

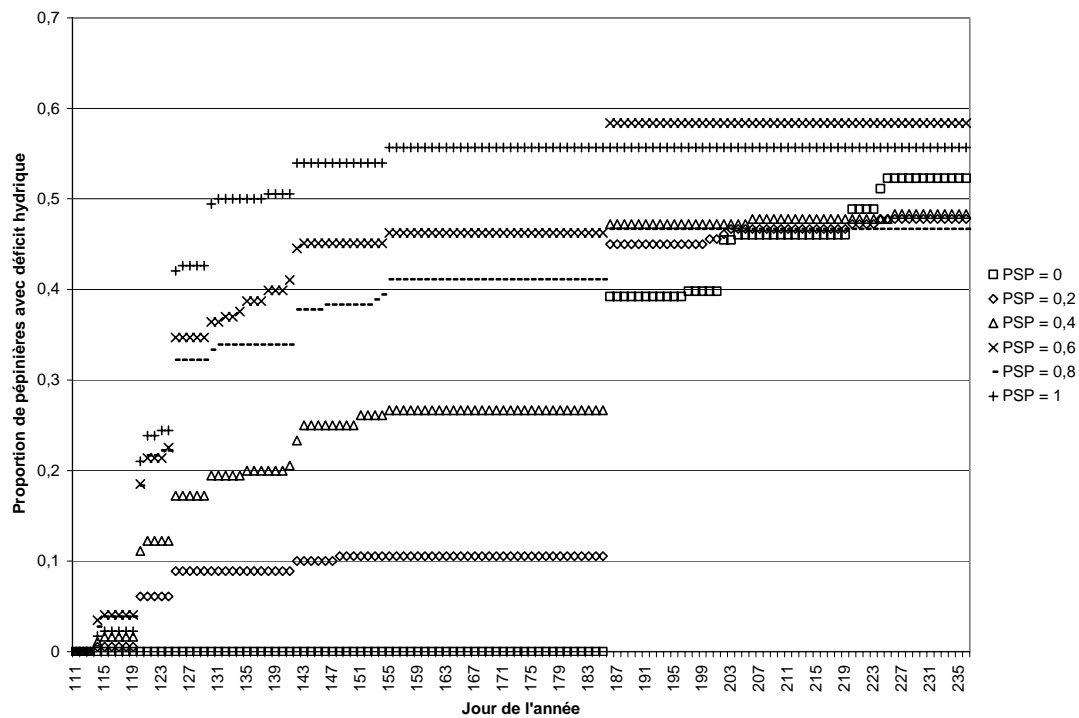


Figure 33. Evolution du nombre de pépinières stressées en fonction de la proportion de pépinières semées précocement (PSP).

Pour une même année de pluie choisie au hasard à la station de l'aéroport d'Ubon Ratchathani (1967), l'évolution dans le temps de la proportion de pépinières ayant subi un déficit hydrique est observée pour plusieurs proportions de semis précoce. Le nombre de pépinières avec un déficit hydrique apparaît à partir du 110^{ème} pas de temps, au moment du premier pic de semis (Figure 33). La proportion de pépinières en déficit hydrique augmente d'autant plus rapidement que la proportion de celles qui ont été semées précocement est importante, avec cependant une inversion de cette tendance dans le cas de pépinières toutes semées tardivement (PSP=0). Cette inversion est certainement liée au fait que, dans ce dernier cas, toutes les pépinières sont semées le même jour et, même si la pluviométrie est plus importante à cette époque de l'année, le volume disponible dans les bassins est insuffisant pour irriguer toutes les pépinières en déficit hydrique. Quelle que soit la proportion de pépinières semées précocement, la proportion finale de pépinières en déficit hydrique est très importante, toujours supérieure à 0,45. Ce résultat est peut-

être dû à l'année de pluie choisie pour la simulation : il est tombé 1294 mm en 1967. Cette année est donc particulièrement sèche par rapport à la moyenne interannuelle de 1600 mm. La figure 34 va permettre de vérifier l'effet de l'année pluviométrique sur la proportion finale de pépinières stressées.

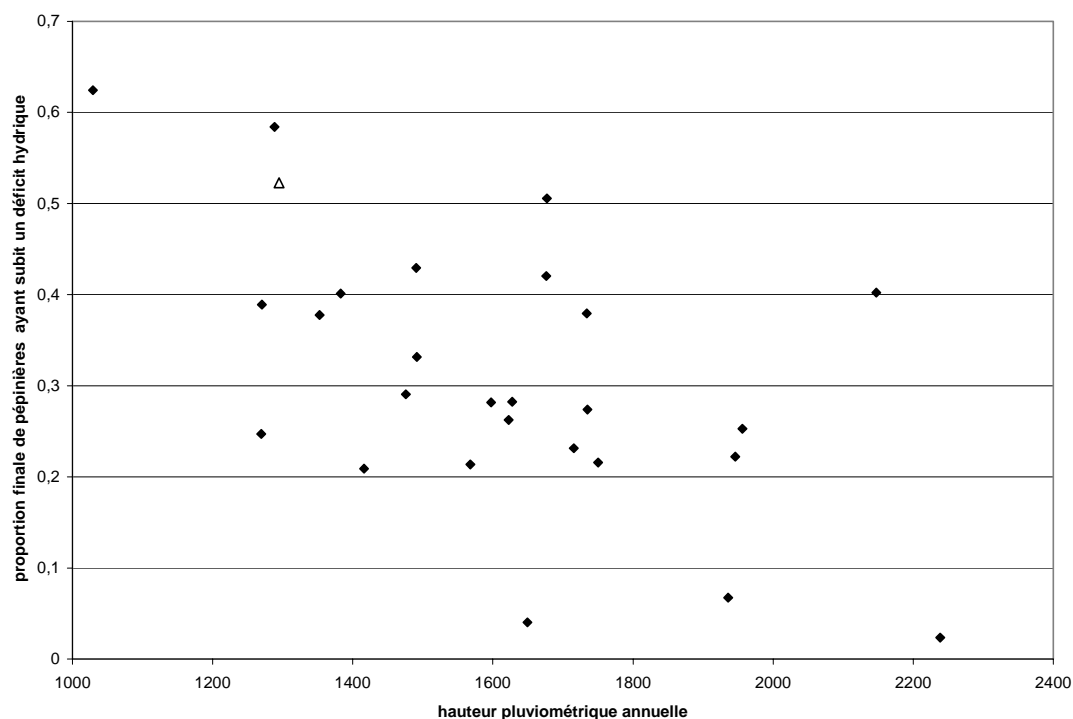


Figure 34. Influence de l'année pluviométrique sur la proportion finale de pépinières ayant subi un déficit hydrique

Les points représentés sur la figure 34 correspondent tous à un semis tardif (PSP=0). Le triangle correspond à l'année utilisée dans la figure 33. Cette année est effectivement l'une des plus sèches parmi les années utilisées pour les simulations. La proportion finale de pépinières ayant subi un déficit hydrique semble décroître avec la hauteur pluviométrique de l'année, résultat qui semble logique. Sur l'ensemble des années simulées, la proportion finale moyenne de pépinières ayant subi un déficit hydrique est de 0,31. Ce résultat est assez élevé : le tiers des pépinières a été déficitaire en eau. Cette proportion semble un peu trop forte par rapport à la réalité d'autant plus qu'il s'agit ici de pépinières toutes semées tardivement (PSP=0) à l'époque où les pluies sont intenses et le déficit hydrique des sols moins probable. Il serait donc nécessaire de revoir la fonction « Evaluation du Déficit Hydrique » qui est sans doute un peu trop « sévère » dans son état actuelle puisqu'elle estime qu'une pépinière a été déficitaire en eau après seulement une journée de déficit hydrique. Nous entrons ici dans la question des perceptions et catégorisations de l'hydrologie en fonction des acteurs et des usages. La question du stress hydrique dépendra de l'agriculteur, de ses objectifs, de ses variétés et d'autres paramètres.

Ces vérifications successives ont permis de corriger un certain nombre d'erreurs de programmation puis de vérifier le fonctionnement du modèle. Elles ont permis également d'identifier le problème de la fonction « Evaluation du Déficit Hydrique ».

IV-2-5. Calibration du modèle

Après avoir vérifié que le modèle fonctionne correctement, il faut s'assurer à présent que les valeurs des paramètres et leurs variations dans le temps sont suffisamment réalistes pour que le modèle puisse permettre ensuite la simulation de situations rencontrées dans la vie réelle. Il faut donc regarder comment évoluent les paramètres du modèle au cours de simulations et les réajuster éventuellement à l'aide de coefficients correcteurs. L'ensemble des simulations réalisées pour la calibration du modèle sont effectuées à partir des hauteurs moyennes de précipitations journalières et d'évapotranspiration journalières calculées à partir de l'ensemble des données disponibles pour la station pluviométrique d'Ubon Ratchathani.

IV-2-5-1. Les variations du niveau de la nappe

Nous choisissons de commencer cette calibration en observant les variations annuelles du niveau d'eau dans les six réservoirs « nappe ». C'est le réservoir dont les variations annuelles sont les mieux connues.

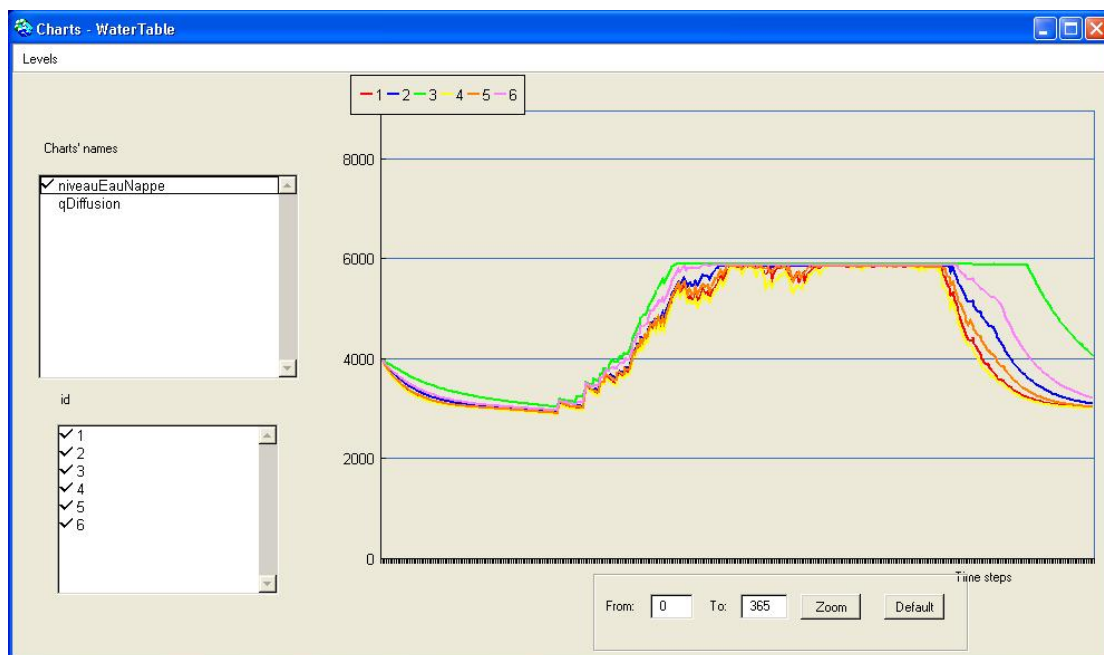


Figure 35. Niveau d'eau dans les réservoirs « nappe » numérotés de 1 à 6

Les unités des axes sur l'ensemble des graphiques de « calibration » sont le jour pour les abscisses et le millimètre ou le millimètre/jour pour les ordonnées. La période simulée est toujours égale à un an.

Un artéfact d'initialisation consiste à fixer à 4 mètres la hauteur initiale de la nappe lui donnant ainsi une profondeur de deux mètres au 1^{er} janvier (Figure 35). Ainsi la nappe a une profondeur assez proche de la réalité en début de saison sèche, estimée à 1,7 mètre en moyenne par Torii et al (1985). Les réservoirs « nappe » se vident progressivement par vidange dans la rivière jusqu'à ce que la profondeur de la nappe atteigne sa valeur maximale de trois mètres. Pour le moment, la seule cause

pouvant entraîner un abaissement supplémentaire du niveau de la nappe est l'évaporation de l'eau de la rivière.

Il faut distinguer ici la percolation « entrante » qui correspond au volume d'eau arrivant dans le réservoir « nappe » par percolation, de la percolation « sortante » correspondant au volume d'eau quittant le réservoir « zone racinaire ». Ces deux valeurs ne sont pas les mêmes : la percolation « entrante » est supérieure à la percolation « sortante » afin de tenir compte des conditions aux limites. L'eau qui diffuse de la nappe vers la rivière ne provient pas uniquement des réservoirs « zone racinaire » représentés dans le modèle, mais également de la partie de la nappe extérieure à la zone modélisée.

Les valeurs prises par les fonctions « diffusion » et « percolation entrante » sont ajustées par des coefficients correcteurs de manière :

- à ce que la nappe atteigne la surface au début du mois d'août correspondant généralement à l'apparition des premières inondations dans les rizières,
- à ce que le niveau de la nappe redescende au début du mois d'octobre, conformément aux mesures piézométriques (Tableaux 14 et 15, annexes V) réalisées en 1994 au cours de l'étude sur l'effet de la compaction des sols (Harnpichitvitaya, 2000).

Un rapport (« percolation entrante »/« percolation sortante ») égale à douze et un coefficient multiplicateur de la « diffusion » fixé à 0,1 donnent de bons résultats.

IV-2-5-2. Les variations de l'humidité de la zone racinaire

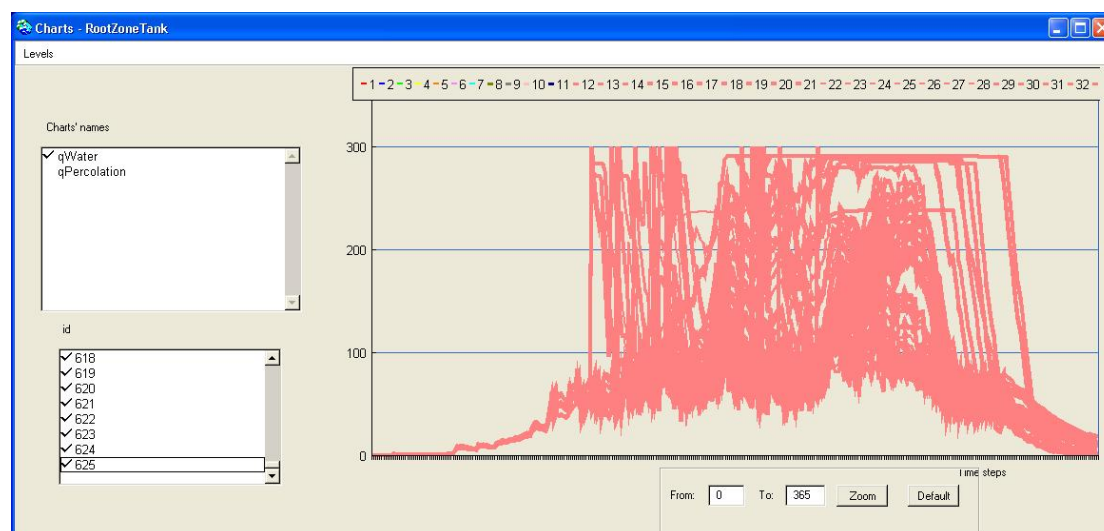


Figure 36. Niveau de l'eau dans les 625 réservoirs « zone racinaire »

La figure 36 montre que l'évolution de l'humidité des zones racinaires est conforme aux conditions hydrologiques généralement observées en riziculture inondée : un assèchement quasi total des parcelles en saison sèche, un début de cycle cultural avec des irrigations d'appoint et pour la plupart d'entre elles (cela dépend du type de sol), une saturation de la zone racinaire d'août à octobre. L'obtention d'un bon calage se fait en jouant sur la valeur de la « percolation sortante »²: elle est

² Le rapport (« percolation entrante » / « percolation sortante »), égal à 12, tient compte de cette modification.

finalement égale au quinzième de la valeur des conductivité hydraulique à saturation correspondant à la zone racinaire et correspondant à la percolation maximale. Après avoir divisé par dix puis par quinze les valeurs de conductivité hydraulique initialement calculées, l'ordre de grandeur (5-20 mm/jour pour la percolation) est finalement retrouvé ! (Tableau 6 Annexes IV et paragraphe IV-1-4-2). Ce résultat permet de conclure en offrant deux explications possibles :

- soit la méthode consistant à prendre la médiane des intervalles de valeurs théoriques de conductivité hydraulique pour déterminer des intensités maximales d'« infiltration », « percolation » et « diffusion » ne convient pas,
- soit la réorganisation du sol (cf. paragraphe IV-1-4-3), formation de croûte de surface et migration des particules d'argiles vers des zones d'accumulation, aboutit à des diminution de la conductivité hydraulique d'un facteur cent.

Des mesures directes effectuées sur des échantillons de sol « en place » devraient permettre de valider ces réflexions.

IV-2-5-3. Les variations du niveau d'eau dans les casiers rizicoles

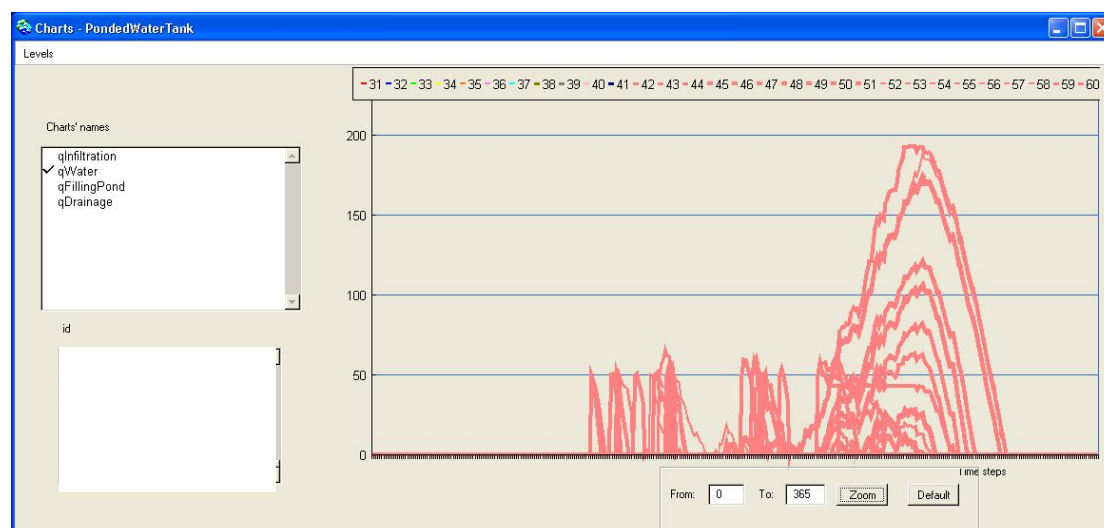


Figure 37. Niveau d'eau dans les 625 casiers rizicoles

D'après les résultats d'enquêtes, l'eau commence à recouvrir les casiers rizicoles de façon persistante au début du mois d'août, lorsque la nappe atteint la surface du sol. Puis elle disparaît début octobre avec la redescente du niveau de la nappe. La valeur maximale de la fonction « infiltration » doit être ajustée pour que le niveau d'eau calculé par le modèle (Figure 37) respecte ce cycle de variations. Cet ajustement doit également tenir compte de la quantité d'eau qui doit entrer dans la zone racinaire pour maintenir son taux d'humidité à des valeurs réalistes. Un coefficient multiplicateur de 0,5 est à son tour appliqué à la fonction « infiltration » pour obtenir le résultat souhaité. Ici encore, la surestimation des conductivités hydrauliques pour le réservoir « zone racinaire » est confirmée. L'absence de débordement des casiers au cours de cette simulation (constatée normalement en fin de saison des pluies) est due à l'utilisation d'une année de pluie moyenne sans véritable pic de la pluviométrie constaté normalement en fin de saison des pluies.

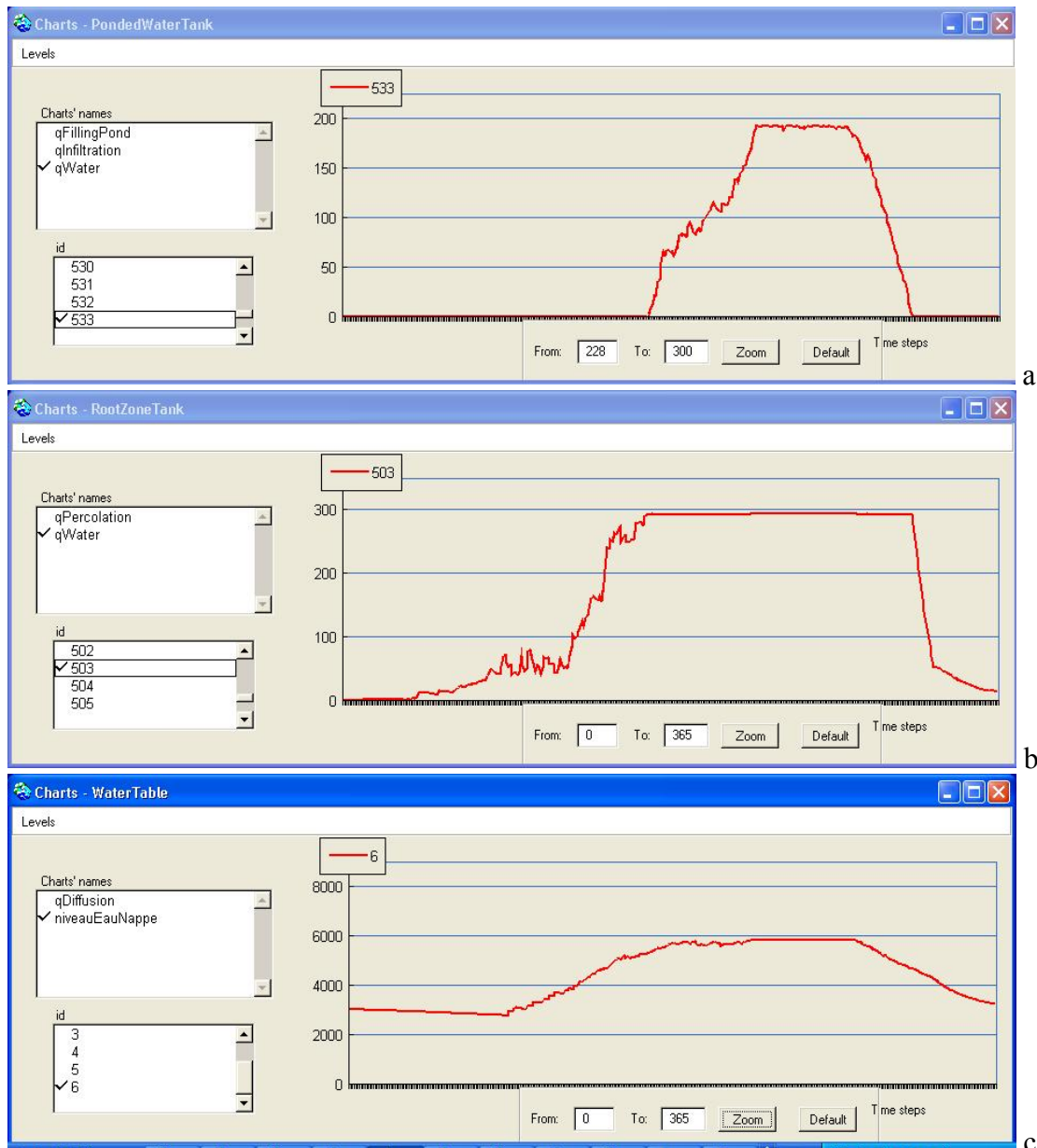


Figure 38. Relations entre les 3 réservoirs « casier », « zone racinaire » et « nappe » superposés

- Niveau d'eau dans le réservoir « casier »
- Niveau d'eau dans le réservoir « zone racinaire »
- Niveau d'eau dans le réservoir « nappe »

En conclusion sur le fonctionnement hydrologique de la parcelle rizicole, la figure 38 illustre bien l'interaction entre les réservoirs superposés : quand le niveau de la nappe se rapproche de la surface, le taux de percolation diminue, causant une augmentation du taux d'humidité de la zone racinaire jusqu'à atteindre la saturation. A ce stade, l'infiltration diminue provoquant l'apparition et le maintien d'une lame d'eau dans le casier jusqu'à la chute des niveaux d'eau des réservoirs inférieurs à la fin de la saison des pluies. La comparaison des niveaux d'eau sur les graphiques b et c illustre le phénomène de nappe perchée en saison pré-humide, souvent évoqué en écosystème de riziculture inondée.

IV-2-5-4. Les variations du niveau d'eau dans les bassins

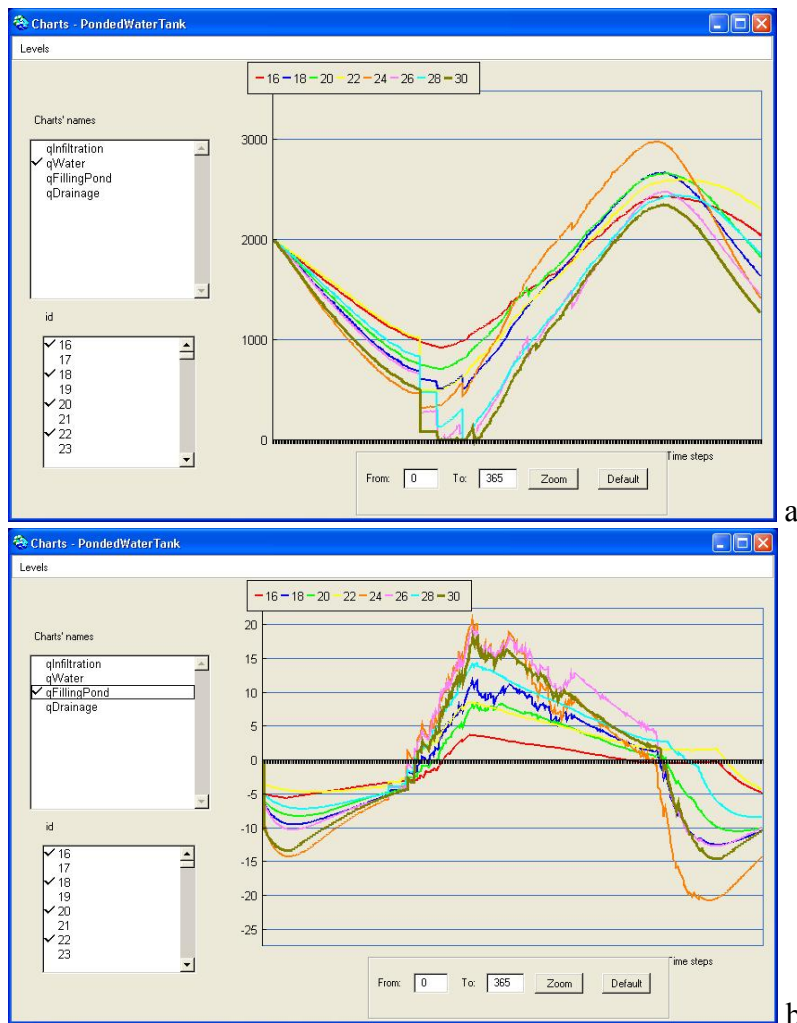


Figure 39. Fonctionnement des bassins
a) Variation du niveau d'eau dans 8 des 15 bassins
b) Taux de diffusion entre les bassins et la nappe

La variation du niveau d'eau dans les bassins (Figure 39a) doit respecter le dire des paysans enquêtés et les observations de terrain à la fin du mois d'avril (cf. paragraphe IV-1-3-2) et les pertes (ou gain) d'eau du bassin, par diffusion dans le sol (le réservoir « nappe ») (Figure 39b) doivent correspondre aux valeurs mesurées expérimentalement (Guerra *et al.*, 1990) comprises entre 2 et 15 mm/j. En jouant sur la valeur maximale de la diffusion bassin-nappe, un coefficient multiplicateur égal à 1/30 est finalement appliqué à la fonction. La surestimation des valeurs de conductivité hydraulique précédemment calculée est, une fois de plus, confirmée.

IV-2-5-5. Le débit de la rivière

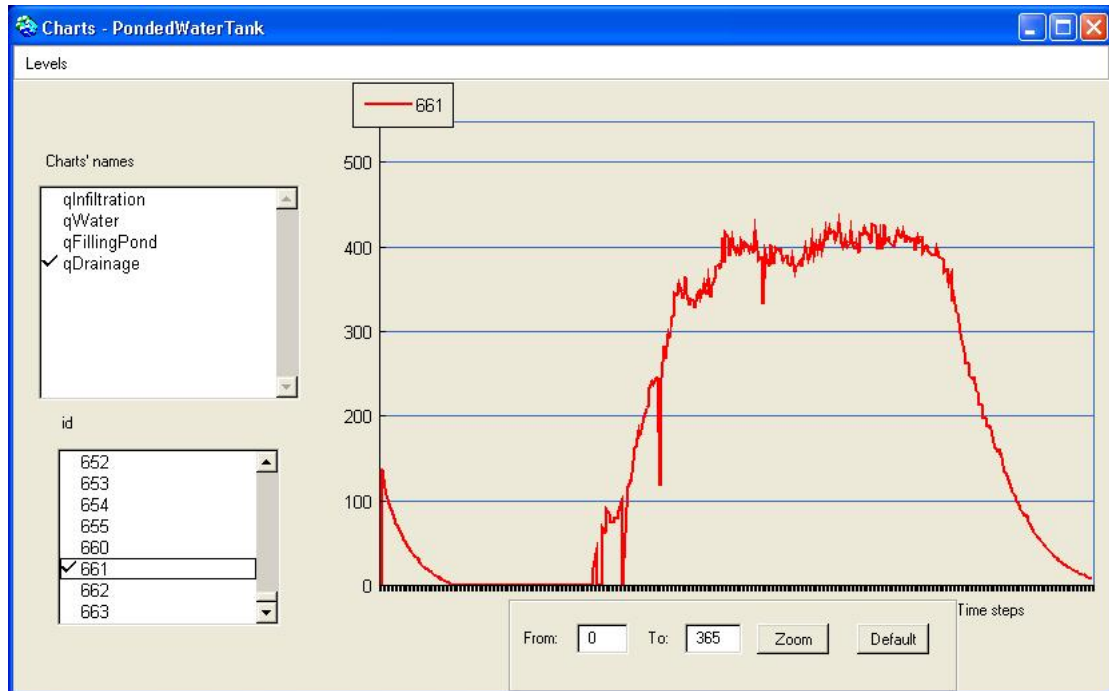


Figure 40. Débit de la rivière Huay Bua à sa confluence avec la rivière Lam Dom Yaï

La fonction drainage du réservoir le plus en aval de la rivière Huay Bua représente la quantité quotidienne d'eau qui passe au dessus du seuil de ce réservoir et se déverse dans le réservoir de la rivière Lam Dom Yaï. Ce volume journalier est donc un débit exprimé en mm/jour et représenté sur la figure 40. En le multipliant par la surface du réservoir de la Huay Bua, on obtient un débit maximal de 0,15 L/s. Des mesures de débit de la rivière Huay Bua offriraient ainsi une nouvelle voie pour calibrer le modèle en tenant compte du rapport entre la surface modélisée et la superficie totale du bassin versant de la Huay Bua. On peut cependant conclure sur la forme particulièrement « lissée » de cette courbe, surprenante pour le régime d'une petite rivière soumise à des pluies de mousson sur un sol à faible capacité de stockage. Cette forme en cloche est la conséquence de la présence des diguettes qui empêchent, pour cette simulation, l'écoulement des eaux de ruissellement dans la rivière. Les deux décrochements pendant la phase ascendante ne peuvent s'expliquer, pour le moment, que par l'existence d'un « bug » informatique... La décroissance initiale du débit n'est que la conséquence d'un artéfact d'initialisation consistant à fixer le niveau initial des nappes au dessus du niveau de la rivière.

Une fois calibré, le modèle est prêt pour la simulation des premiers scénarios.

IV-3. Les scénarios

IV-3-1. Objectifs de la simulation

Les phases de vérification et de calibration du modèle ont permis de donner une crédibilité au modèle permettant de juger de la validité des résultats de ses futures simulations. Ce modèle peut donc constituer, dans un cadre défini, un laboratoire virtuel permettant d'expérimenter divers scénarios, et cela sans engendrer d'externalités négatives pour les paysans, et d'observer les indicateurs qu'il prévoit (Barreteau, 1998). Dans une seconde étape, les résultats du modèle peuvent être soumis aux acteurs du monde réel via des jeux de rôle par exemple (Barreteau *et al.*, 2001). Par leurs réactions, les acteurs valident ou remettent en cause le modèle qui joue ici le rôle de guide dans un processus d'accompagnement de la recherche (Bousquet *et al.*, 2001).

Une question d'actualité dans le nord-est de la Thaïlande est d'estimer l'efficacité des bassins dans leur capacité à autoriser des semis en pépinières toujours plus précoces : un nombre croissant de paysans s'orientent vers une production majoritairement commercialisée et veulent, par conséquent, allonger au maximum la durée de la phase végétative, période durant laquelle la plante accumule la biomasse nécessaire au remplissage des grains avant la récolte. Ce choix concerne surtout les variétés photopériodiques (majoritaires en riziculture inondée dans le nord-est de la Thaïlande) à date de floraison fixe.

Un scénario consiste donc à tester l'efficacité des bassins en observant le nombre final de pépinières qui ont subi un déficit hydrique. Afin de prendre en compte la variabilité interannuelle des pluies, 27 années de mesures communes de la pluviométrie et de l'évapotranspiration potentielle à la station météorologique de l'aéroport d'Ubon Ratchathani sont utilisées. Des scénarios correspondant à des situations avec présence puis absence de bassins vont permettre de quantifier leur effet sur la proportion finale de pépinières ayant subi un stress hydrique. Pour chaque scénario, la proportion de pépinières de riz semées précocement et tardivement est prédéfinie. Il est ainsi possible de mesurer l'effet de la proportion de pépinières semées précocement sur le nombre totale de pépinières ayant subi un déficit hydrique.

IV-3-2. Résultats d'une première simulation

IV-3-2-1 Protocole expérimental

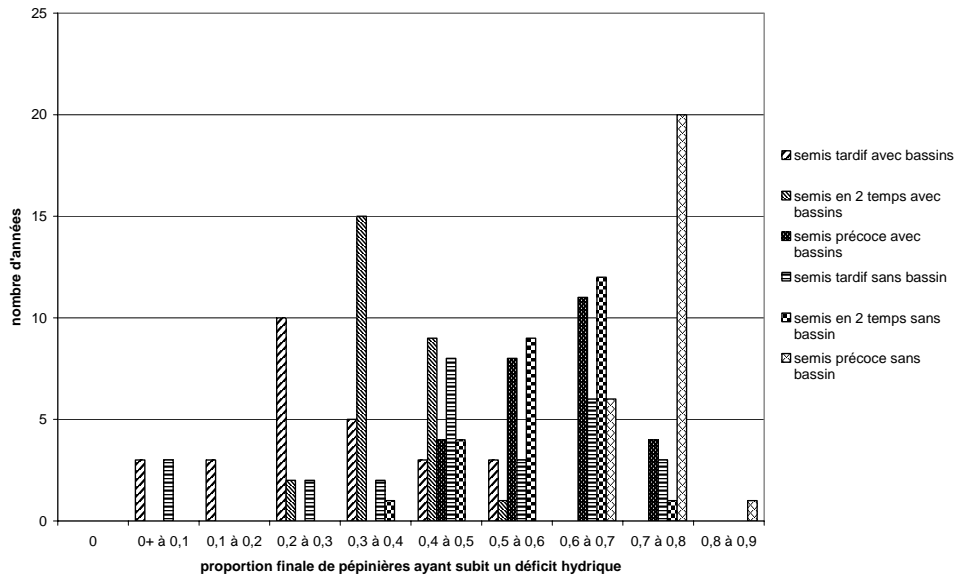
Six scénarios correspondant à six situations différentes sont envisagés :

3 valeurs différentes pour la proportion de pépinières semées précocement :

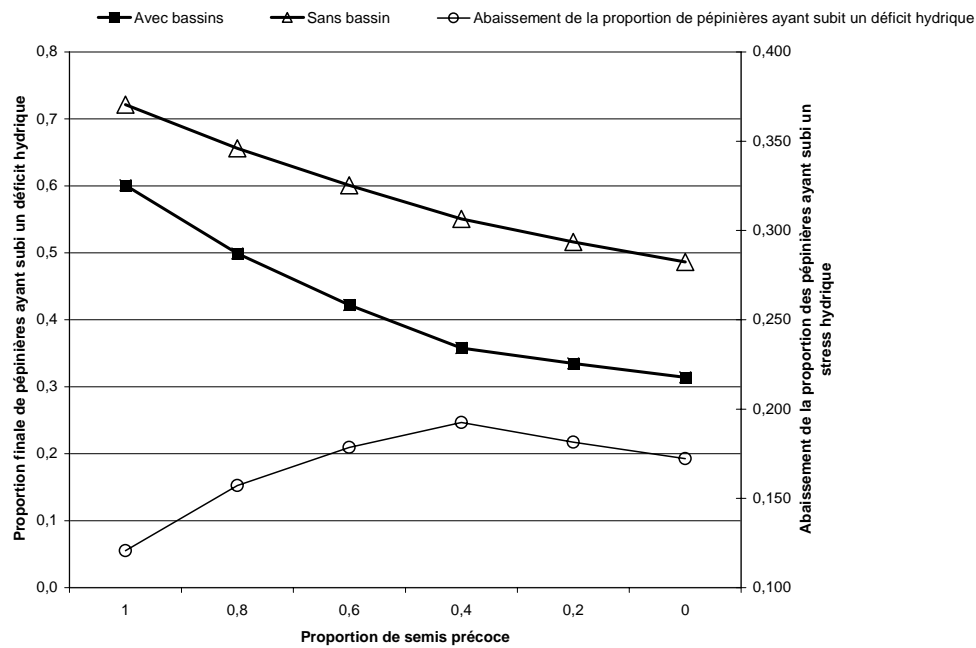
- 1 : un semis précoce (20 avril) pour toutes les pépinières,
- 0,5 : des semis différés avec 50% des pépinières en semis précoce et 50% en semis tardif (1^{er} juillet),
- 0 : un semis tardif pour toutes les pépinières,

combinées à deux situations : avec et sans bassin.

IV-3-2-2 Résultats



a



b

Figure 41. Effet de la présence des bassins sur la proportion de pépinières ayant subi un déficit hydrique

a) Distribution des différentes classes de proportion parmi les 27 années

b) Abaissement du déficit hydrique en fonction de la proportion de semis précoce.

La figure 41a donne une première illustration de l'effet de la présence des bassins se traduisant par une diminution du nombre d'années avec une forte proportion finale de pépinières ayant subi un déficit hydrique jusqu'au repiquage. Il convient de rappeler qu'une pépinière est identifiée comme ayant subi un déficit hydrique si elle a passé au moins un jour avec un taux d'humidité inférieur à la

capacité au champ après avoir été éventuellement irriguée. A partir des 27 années simulées, une valeur moyenne pour la proportion finale de pépinières en déficit hydrique est calculée pour chaque proportion de semis précoce avec et sans bassin (Figure 41b).

IV-3-2-3 Interprétations et discussions

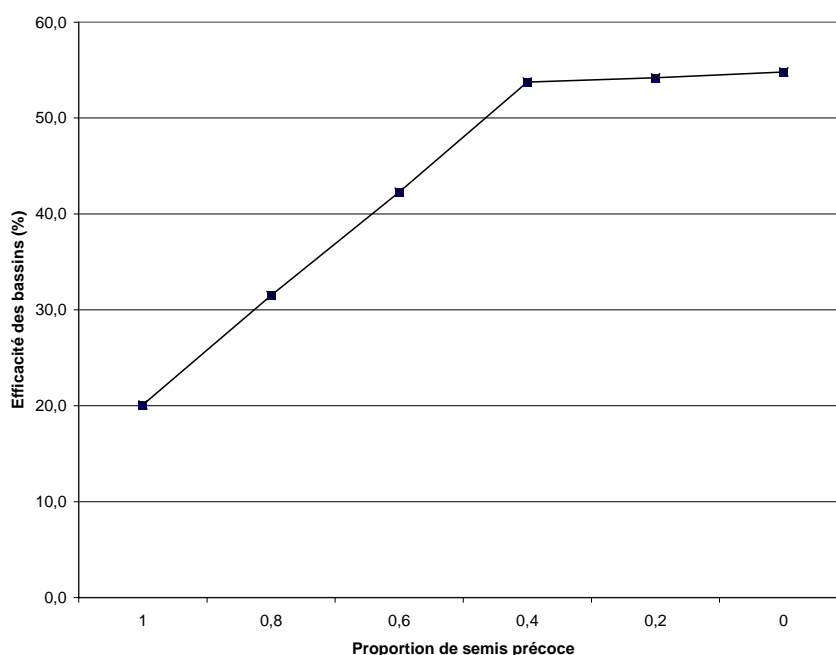


Figure 42. Efficacité des bassins.

Un taux d'abaissement de la proportion de pépinière en déficit hydrique est calculé (Figure 41b) puis ramené à la proportion totale de pépinières en déficit quand il n'y a pas de bassin. On obtient ainsi une estimation de l'efficacité des bassins pour chaque valeur de la proportion de semis précoce (Figure 42). L'efficacité des bassins est minimale pour un semis uniquement précoce puis elle augmente alors que de plus en plus de pépinières sont semées tardivement. Les bassins sont donc peu efficaces quand la proportion de semis précoce augmente : ils ne « parviennent » par irriguer toutes les pépinières en déficit hydrique. On comprend bien le dilemme en face duquel sont placés les agriculteurs : Faut-il privilégier la sécurité alimentaire et diminuer la proportion de pépinières semées précocement pour avoir moins de pertes ou semer plus précocement pour maximiser le revenu final avec le risque de pertes importantes si le début de saison agricole est trop sec. En deçà d'une proportion de semis précoce égale à 0,4 (valeur à préciser avec d'autres simulations), l'efficacité des bassins augmente plus lentement. Cette valeur seuil constitue peut-être un bon compromis pour les agriculteurs et elle devra être comparée aux conduites culturales couramment pratiquées dans la zone d'études lors d'un retour sur le terrain. Cette analyse pourrait être affinée en observant les variations de ce seuil en fonction des types d'années (sèche ou humide), de la durée séparant les deux pics de semis, de la distance maximale entre les bassins et les pépinières à irriguer, de la distribution spatiale des sols. Ces premiers résultats devraient être exposés aux paysans pour savoir quelle valeur ils leur accordent, lesquels sont les plus significatifs pour eux.

IV-3-3 Perspectives.

L'efficacité des bassins correspondant à 100% de semis précoce est très faible : 20%. Il serait utile de savoir si ce nombre est du à une inadaptation du modèle par des vérifications expérimentales. Si cette inefficacité se confirme, de nouvelles analyses, via simulations, pourraient consister à observer l'effet de modifications sur la conception des bassins et identifier d'éventuelles voies d'amélioration :

- effet d'un agrandissement de leur périmètre de captage des eaux de pluies avec les conséquences que cela pourrait avoir sur la diminution des surfaces cultivables,
- effet d'une imperméabilisation de leurs parois avec le risque de limiter leur remplissage par diffusion de la nappe.

Un scénario tendanciel identifié pendant les enquêtes correspond à la multiplication du nombre de forages puisant l'eau de la nappe pour l'irrigation des pépinières de riz ou des maraîchers. La simulation d'un tel scénario permettrait d'observer les conséquences sur le niveau de la nappe, d'estimer les risques de son assèchement en saison sèche et des possibilités de tarissement momentané des ressources en eau potable.

Il serait intéressant par la suite d'exploiter pleinement les capacités offertes par les systèmes multi-agents en introduisant des « agents » actifs, représentant les paysans, doués d'une autonomie dans leur prise de décision, et capables de modifier les conditions d'irrigation selon leurs propres objectifs. (Bousquet *et al.*, 1995). Des comparaisons entre le récit de ce qu'ils ont fait au cours d'années particulièrement sèches et le résultat des simulations correspondant à ces mêmes années pluviométriques permettraient d'intéressantes confrontations du monde réel au monde simulé, utiles pour une compréhension plus approfondie des mécanismes d'adaptation des paysans à la variabilité des pluies (Kuper *et al.*, 2001).

Conclusions

L'objectif initial de ce travail était de caractériser la variabilité climatique et les usages de l'eau puis de faire un modèle pour croiser ces caractérisations et comprendre les stratégies d'adaptation des paysans. Un premier travail d'investigation (collecte des données primaires existantes pour la région) a permis d'identifier les données nécessaires à la poursuite des recherches et les lacunes devant être comblées par des recherches plus approfondies. Par l'effort même de réflexion et d'abstraction engagé et nécessaire à la conceptualisation du modèle, une architecture fondatrice du modèle et formalisant ma perception a pu être construite. Associée à un travail d'enquêtes approfondi en milieu paysan et une analyse fréquentielle de la pluviométrie, elle a permis :

- d'identifier et de caractériser les principales sources de variabilité (climatique, pédologique, topographique, économique) contrôlant la distribution spatiale et temporelle de la ressource en eau,
- de comprendre comment les agriculteurs, en développant des stratégies pour le choix et la conduite de leurs cultures, adaptent leurs usages de l'eau à la dynamique de la ressource.

Le modèle, après avoir été implémenté puis validé aux cours des étapes de vérification et de calibration, a permis de conduire, à titre d'exemple, quelques simulations sur le thème de l'efficacité des bassins, jugée primordiale dans l'adaptation des paysans à la variabilité. A partir de cet exemple, plusieurs plans de recherches ont été envisagés, démontrant ainsi les potentialités du modèle.

Ce modèle donne la possibilité à de nombreuses expérimentations sur des sujets d'importance capitale pour la région. On pourrait envisager, par exemple, un scénario avec une multiplication des forages et les conséquences possibles sur le niveau de la nappe, particulièrement pendant la saison sèche, lorsque la seule source d'eau potable est l'eau du sous-sol.

Dans une seconde étape, le modèle actuel pourrait être le point de départ pour une nouvelle investigation avec une approche socio-économique, complémentaire de la première. L'analyse des relations de coopération et des coordinations existantes ou souhaitées par les paysans dans la gestion de l'eau, via des jeux de rôles par exemple, (Barreteau *et al.*, 2003), pourraient certainement contribuer à une meilleure utilisation des ressources d'eau collectives (grands bassins notamment) sous-exploités actuellement.

BIBLIOGRAPHIE

Ahuja LR, Cassel DK, Bruce RR, Barnes BB. 1989. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Science Journal* 148/6: 404-411.

Akatanukul S. 1985. Hydraulic Properties of Major Northeast Soils. Kasetsart University, Bangkok Thaïlande. In: The first KKU-USAID International Seminar: Soil, Water and Crop Management Systems for Rainfed Agriculture In Northeast Thailand, held at Khon Kaen University, Feb. 25 to March 1 1985. Editor: Pairintra C., Wallapapan K., Parr J.F. and C.E. Whitman. 189-200.

Australian Centre for International Agricultural Research. 1997. Breeding Strategies for Rainfed Lowland Rice in Drought-prone Environments. Proceedings of an International Workshop held at Ubon Ratchathani, Thailand, 5-8 November 1996. 248p.

Barreteau B. 1998. Un système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation. Thèse de doctorat soutenue le 8 septembre 1998. ENGREF, Montpellier, France.

Barreteau B, Le Page C, d'Aquino P. 2003. Role-Playing Games, Models and Negotiation Processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 6/2. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/10.html>

Beau F, Thong TQ. 1989. Modélisation d'un bilan hydrique en rizière irriguée. Ecole Nationale des ingénieurs des travaux ruraux et des techniques sanitaires: 84 pages + annexes.

Bhuiyan SI, Zeigler RS. 1994. On-farm rainwater storage and conservation system for drought alleviation : issues and challenges. In : Bhuiyan, S.I. (ed). On-Farm Reservoir Systems for Rainfed Ricelands. Manila, Philippines. International Rice Research Institute. 1-6.

Bouman BAM, Kropff MJ, Tuong TP, Wopereis MCS, ten Berge HFM. van Laar HH. 2001. ORYZA 2000: modeling lowland rice. Metro Manila, International Rice Research Institute. 235 p.

Bousquet F, Bakam I, Proton H, Le Page C. 1998. CORMAS: common-pool resources and multi-agents systems. In: Lecture Notes in Artificial Intelligence 1416. Springer. Berlin.

Bousquet F, Barreteau O, Mullon C, Weber J. 1997. Modélisation d'accompagnement : systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables. In : Actes du Colloque international « Quel environnement au 21^{ème} siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie », GERMES, Paris, France.

Bousquet F, Barreteau O, Weber J. 1995. Systèmes multi-agents et couplage des modèles biophysiques et socio-économiques. Couplage de modèle en agriculture, Montpellier, CIRAD.

Bousquet F, Trébuil G, Boissau S, Baron C, d'Aquino P, Castella JC. 2001. Knowledge Integration for Participatory Land Management : The Use of Multi-Agent Simulations and a Companion Modeling Approach. Contribution à l' « International Workshop on Participatory Technology Development and Local Knowledge for Sustainable Land Use in Southeast Asia », Fondation européenne pour la science et Université de Hohenheim, 6-7 juin 2001, Chiang Maï, Thaïlande. Actes de la conférence sur Cédérom et sur le site web de Mekonginfo - 16 p.

Center for Agricultural Information. 1998. Agricultural statistics of Thailand : crop year 1996/1997. Office of Agricultural Economics. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand.

Département météorologique thaïlandais. 1977. Le climat de la Thaïlande (en thaï). Meteorological Department, Bangkok. Thaïlande.

Donner W. 1978. The Five Faces of Thailand : An economic Geography. London : Hurst.

FAO (1990). Guidelines for soil description, Rome, Italie. 69 p.

Ferber J, Drogoul A. 1992. Using reactive Multi-Agent Systems, in simulation and problem solving. Distributed Artificial Intelligence : Theory and Practice. L. Gasser and N. Avouris. Kluwer.

Fohrer N, Berkenhagen J, Hecker JM, and Rudolph A. 1999. Changing soil and surface conditions during rainfall Single rainstorm / subsequent rainstorms. Elsevier Science B.H. Catena 37 : 355-375.

Formoso B. 1997. Ban Amphawan et Ban Han, le devenir de deux villages rizicoles du nord-est thaïlandais. Ed. : Recherche sur les civilisations/CNRS.

Franquin P. 1973. "La climatologie fréquentielle en agriculture tropicale." Technique et développement 5 : 6-15.

Fukaï S, Basnayake J, Cooper M. 2000. Modeling water availability, crop growth, and yield of rainfed lowland rice genotypes in northeast Thailand. In : Characterizing and Understanding Rainfed Environments. International Rice Research Institute. Manila. 111-130.

Fukui H. 1993. Food and Population in a Northeast Thai village. Monograph of the Center of Southeast Asian Studies, Kyoto University. No. 19. Honolulu, Haw. (USA) : University of Hawaiï. Press. 421 p.

Guerra LC, Watson PG, Bhuiyan SI. 1990. Hydrological characteristics of on-farm reservoirs in rainfed rice-growing areas. In: Agricultural Water Management. Ed. : Elsevier Science, Amsterdam.

Griffiths IF. 1978. Applied climatology : an introduction. 2nd ed., Oxford Univ. Press, England.

Harnpichitvitaya D, Trébuil G, Oberthür T, Pantuwan G, Craig I, Tuong TP, Wade LJ, Suriya-Arunroj D. 2000. Identifying soil suitability for subsoil compaction to improve water- and nutrient-use efficiency in rainfed lowland rice. In : Characterizing and Understanding Rainfed Environments. International Rice Research Institute. Manila. Tuong TP, Kam SP, Pandey S, Bouman BAM, Hardy B (editors). International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Philippines – 97-110.

Hoogmoed WB, Stroosnijder L. 1984. Crust Formation on Sandy Soils in the Sahel. I. Rainfall and Infiltration. Soil and Tillage Research, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Netherlands. 4 :5-23.

Hungspreug S. 2001. Water management in the Korat Basin, northeast Thailand : policy, institutional, and management issues from the farm/village to the region. In : Natural Resource Management Issues in the Korat Basin of Northeast Thailand : An Overview. Editor : International Rice Research Institute. Limited Proceeding. No 7.

JICA : Japan International Cooperation Agency. 1992. The Feasibility Study on the Lam Dom Yaï Basin Irrigation Project. Main report. The Kingdom of Thailand, Ministry of Agriculture and Cooperatives.

Jongdee S, Mitchell JH, Fukai S. 1995. Modelling Approach for Estimation of Rice Yield Reduction Due to Drought in Thailand. Department of Agriculture, University of Queensland, Brisbane, Queensland 4072, Australia. In : S. Fukai, M. Cooper and J. Salisbury. Breeding Strategies for Rainfed Lowland Rice in Drought-prone Environments. Proceedings of an International Workshop held at Ubon Ratchathani, Thailand, 5-8- novembre 1996. ACIAR Proceedings 77 :65-73.

Kam SP, Tuong TP, Bouman BAM, Fajardo S, Reyes JP. 2001. Water-balance modeling to study regional drought risk and crop management strategies. Program report for 2000 : Rainfed lowland rice ecosystem. International Rice Research Institute. Los Banos. 26-29.

Kamoshita A, Rodriguez R, Yamauchi A, Wade LJ. 2001. Response of Rainfed-Lowland Rice Genotypes to Prolonged Drought and Rewatering during Vegetative Stage. In : Increased Lowland Rice Production in the Mekong Region. Ed. : S. Fukai et J. Basnayake. ACIAR Proceedings 101. 78-85.

Kawachi T, Minami I, Adachi KI. 1989. A cost/benefit model for computer-aided optimum design of agricultural farm ponds (Tameike). Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, Japon.

Khon Kaen University – Ford Cropping Systems Project. 1982. An Agroecosystem analysis of Northeast Thailand. Faculty of Agriculture. Khon Kaen University, Khon Kaen, Thaïlande.

Kuper M, Poncet Y, Mullon C, Morand P, Orange D. 2001. Représenter l'espace pour structurer le temps, la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger au Mali. In S. Lardon, P. Maurel, V. Piveteau. Ed. sc. Représentations spatiales et Développement territorial, Ed. Hermès, Paris : chapitre 7 :143-163 + h.t.

LDD : Land Development Department. 1993. Characterization of Soil Series Established in the Northeastern Region and Their Interpretation for Uses, Bangkok, Thaïlande.

Limpinuntana V. 2001. Physical factors related to agricultural potential and limitations in northeast Thailand. In : Natural Resource Management Issues in the Korat Basin of Northeast Thailand : An Overview. Editors : International Rice Research Institute. Limited Proceeding. No 7.

Ly S. 2002. Caractérisation des systèmes de production à riz inondé au sud de la province de Ubon Ratchathani. In : La problématique de la sécurité alimentaire dans la riziculture inondée du Nord-Est de la Thaïlande. Mémoire de DESS. Université Paris-Sud XI. 51 p.

Mackill DJ, Coffman WR, Garrity DP. 1996. Rainfed Lowland Rice Improvement. International Rice Research Institute, PO Box 933, Manila, Philippines, 242 p.

Moncharoen L, Verasilp T, Eswaran H. 1987. Benchmark soils of Thailand. Department of Land Development Thailand, and Soil Management Support Services, USA. 77 p. with 99 appendices.

Mongkolsawat C, Katawatin R, Tulapitak T, Pairintra C. 1995. Physical Environments and Soil Profile Characteristics of Northeast Thailand. Khon Kaen University, Khon Kaen, Thaïlande. In : Proceedings of the first KKU-USAID International Seminar for Rainfed Agriculture in Northeast Thailand, 25 fév. -1 mars 1985, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand. 14-23.

Oberthür T, Kam SP. 2000. Perception, understanding and mapping of soil variability in the rainfed lowlands of northeast Thailand. In : Characterizing and Understanding Rainfed Environments. Edited by T.P. Tuong, S.P. Kam, L. Wade, S. Pandey, B.A.M. Bouman and B. Hardy, International Rice Research Institute, 2000.

Panichapong S. 1988. Soil and water resources in northeast Thailand. In : Proceedings of the first KKU-USAID International Seminar for Rainfed Agriculture in Northeast Thailand, 25 fév. -1 mars 1985, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand. 2-13.

Patamatamkul S. 2001. Development and management of water resources in the Korat Basin of northeast Thailand. In : Kam SP, Hoanh CT, Trébuil G, Hardy B, editors. 2001. Natural resource management issues in the Korat Basin of northeast Thailand: an overview. Proceedings of the Planning Workshop on Ecoregional Approaches to Natural Resource Management in the Korat Basin, Northeast Thailand: Towards Further Research Collaboration, held on 26-29 October 1999, Khon Kaen, Thailand. Los Banos (Philippines): International Rice Research Institute. 169 p.

Prapertchob P. 2001. Human resources and the economy of the Northeast Region of Thailand. In : Natural Resource Management Issues in the Korat Basin of Northeast Thailand : An Overview. Editors : International Rice Research Institute. Limited Proceeding. No 7.

Rigg J. 1991. Homogeneity and Heterogeneity : An Analysis of the Nature of Variation in Northeastern Thailand. *Malaysian Journal of Tropical Geography*. 22:63-72.

Ritchie JT, Gerakis A, Suleiman A. 1999. Simple model to estimate field-measured soil water limits. *Transactions of the ASAE* 42(6): 1609-1614.

Rumbauch J, Blaha W, Eddy F, Lorensen W. 1997. (OMT) Modélisation et conception orientées objet. Edition Masson, Paris.

Saenjan P, MacLean PA, Mongkolsawat C. 1992. Patterns of wet season rainfall in northeast Thailand : rain-days and no-rain days. In : Remote Sensing, Soil land Water Management in Northeast Thailand Project. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand. McGill University, Department of Geography, Montreal, Canada.

Saxton KE, Rawls WJ, Romberger JS, Papendick RI. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Journal* 50/4: 1031-1036.

Somrith B. 1997. Cultivar improvement for Rainfed Lowland Rice in Thailand in: Breeding Strategies for Rainfed Lowland Rice. In : S. Fukai, M. Cooper and J. Salisbury. Breeding Strategies for Rainfed Lowland Rice in Drought-prone Environments. Proceedings of an International Workshop held at Ubon Ratchathani, Thailand, 5-8- novembre 1996. *ACIAR Proceedings* 77 : 36-42.

Srisuk K, Sriboonlue V, Buaphan C, Hovijitra C. 2001. The potential of water resources in the Korat Basin, northeast Thailand. In : Natural Resource Management Issues in the Korat Basin of Northeast Thailand : An Overview. Editors : International Rice Research Institute. Limited Proceeding. No 7.

Suzuki K, Goto A, Mizutani M, and Sriboonlue V. 2001. Modeling of hydrologic processes in rainfed paddy fields in northeast Thailand. International Commission on Irrigation and Drainage 1st Asian Regional Conference, Séoul.

Tomar VS. 1996. Soil Physical Limitations for Rainfed Lowland Rice. Jawahar Lal Nehru Krishi Vishwa Vidyalaya Agricultural University, Sehore, India. In : S. Fukai, M. Cooper and J. Salisbury. Breeding Strategies for Rainfed Lowland Rice in Drought-prone Environments. Proceedings of an International Workshop held at Ubon Ratchathani, Thailand, 5-8- novembre 1996. *ACIAR Proceedings* 77 : 209-221.

Torii K. Minami I. 1985. Application of a Mini-pond System to Rural Development in Northeast Thailand. Technical Paper, Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, Japon. In : Irrigation Engineering and Rural Planning, No. 8.

Trébuil G. Hossain M. 2000. Les grands types de rizicultures en Asie du Sud-Est : Transformations récentes, enjeux actuels et perspectives d'évolution. . In : Revue Tiers Monde, Presses universitaires de France, IEDES, Université Panthéon-Sorbonne, Paris- XLI/162:277-299.

Vorasoot N. 1985. Agroclimatology in Northeast Thailand. Khon Kaen University. In : Rainfed Agriculture in Northeast Thailand. Soil, Water and Crop Management Systems. Khon Kaen University, U.S. Department of Agriculture, U.S. Agency for International Development. 40-49.

Widawsky DA. O'Toole JC. 1990. Prioritizing the Rice Biotechnology Research Agenda for Eastern India. Rockefeller Foundation, New York, USA.

Wigzell S. Setboonsarng S. 1995. The Diffusion of Integrated Farming in Northeast Thailand. Aquaculture Division, School of Environment and Resources Development, Asian Institute of Technology (AIT), Thailand. In : TEI Quartely Environment Journal 3/2:14-46.

Williams RD. Ahuja LR. 1993. Using available water content with the one-parameter model to estimate soil water retention. Soil Science Journal 156/6:380-388.

Wopereis MCS., Kropff MJ, Tuong TP. 1996. Modelling the Soil-Plant-Water Balance of Rainfed Lowland Rice. Manila, International Rice Research Institute: 168-185.

Yuvaniyama A. 2001. Managing problem soils in northeast Thailand. In : Natural Resource Management Issues in the Korat Basin of Northeast Thailand : An Overview. Editors : International Rice Research Institute. Limited Proceeding. No 7.

Zhang XC, Miller WP. 1996. Physical and Chemical Crusting Processes Affecting Runoff and Erosion in Furrows.

ANNEXES

Annexes I. Classification des projets d'irrigation

Type	Capacité de stockage (10 ⁶ m ³)	Surface de la retenue (km ²)	Aire irriguée (ha)
Moyen	> 100	> 15	> 12 800
Grand	<100	< 15	< 12 800

Tableau 1. (Réf : Royal Irrigation Department. 1999. Irrigation project statistics. Bangkok, Thailand. 299 p.)

Annexes II. Analyse de la variabilité des pluies par analyse en composantes principales normées (ACP)

II-1 ACP normées sur les hauteurs pluviométriques annuelles

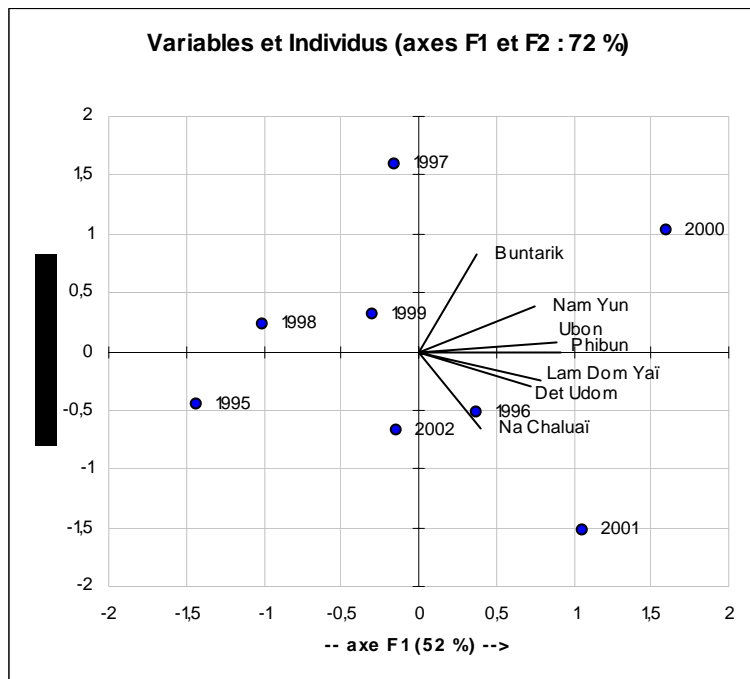


Figure 43. Analyse en composantes principales normées effectuée sur les hauteurs pluviométriques annuelles. Variables : les stations. Individus : les années.

	Det Udom	Lam Dom Yaï SHS	Nam Yun	Na Chaluai	Buntarik	Ubon	Phibun
Det Udom	1	0,491	0,315	0,502	0,190	0,598	0,533
Lam Dom Yaï SHS	0,491	1	0,418	0,178	-0,071	0,770	0,728
Nam Yun	0,315	0,418	1	0,220	0,552	0,550	0,706
Na Chaluai	0,502	0,178	0,220	1	-0,206	0,159	0,340
Buntarik	0,190	-0,071	0,552	-0,206	1	0,358	0,273
Ubon	0,598	0,770	0,550	0,159	0,358	1	0,747
Phibun	0,533	0,728	0,706	0,340	0,273	0,747	1

Tableau 2. Matrice des corrélations sur les hauteurs annuelles de pluies de 1995 à 2002. En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,05 (test bilatéral)

	F1	F2	F3
Det Udom	14,567	6,361	7,125
Lam Dom Yaï SHS	16,980	4,243	30,105
Nam Yun	15,689	10,542	4,981
Na Chaluai	4,361	30,223	38,209
Buntarik	3,862	48,151	11,941
Ubon	21,705	0,480	7,014
Phibun	22,836	0,001	0,625

Tableau 3. Contribution des variables (%).

	F1	F2	F3
1995	29,266	2,802	16,487
1996	2,030	3,937	25,764
1997	0,360	36,152	4,421
1998	14,383	0,722	7,394
1999	1,240	1,393	41,862
2000	36,452	15,302	0,407
2001	15,974	33,324	2,266
2002	0,295	6,369	1,398

Tableau 4. Contribution des individus (%)

II-2. ACP sur les hauteurs pluviométriques mensuelles

Les résultats de cette ACP étant relativement identiques pour les hauteurs pluviométriques décadaires et journalières, celles-ci ne sont pas représentées ici.

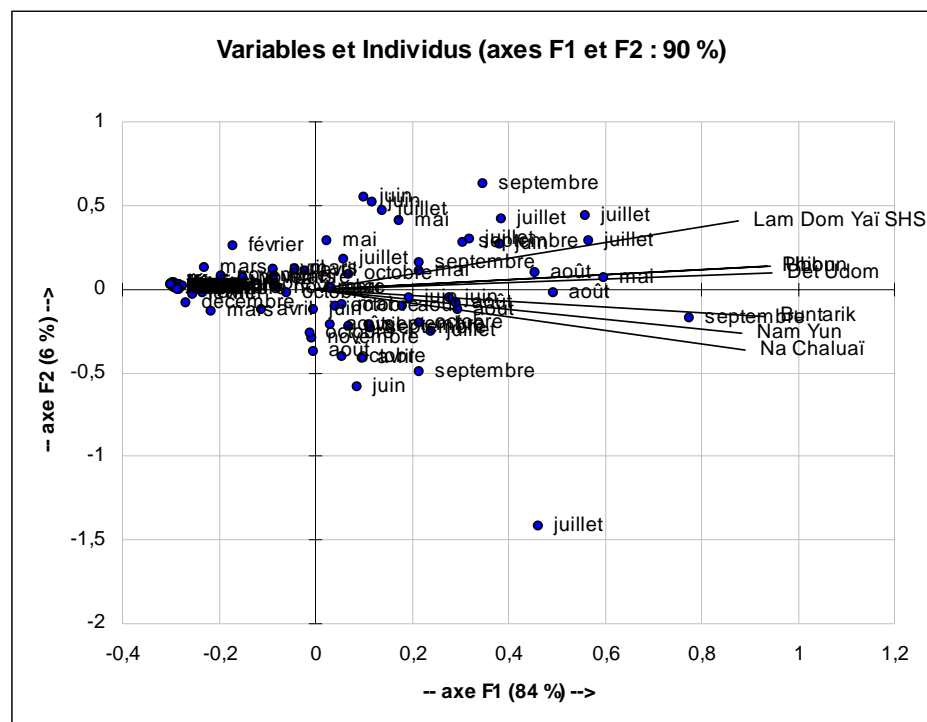


Figure 44. Analyse en composantes principales normées effectuée sur les hauteurs pluviométriques mensuelles. Variables : les stations. Individus : les mois.

	Det Udom	LDY SHS	Nam Yun	Na Chaluai	Buntarik	Ubon	Phibun
Det Udom	1,00	0,88	0,79	0,84	0,84	0,87	0,84
Lam Dom Yaï SHS	0,88	1,00	0,71	0,65	0,73	0,83	0,82
Nam Yun	0,79	0,71	1,00	0,82	0,81	0,77	0,78
Na Chaluai	0,84	0,65	0,82	1,00	0,86	0,79	0,76
Buntarik	0,84	0,73	0,81	0,86	1,00	0,85	0,86
Ubon	0,87	0,83	0,77	0,79	0,85	1,00	0,92
Phibun	0,84	0,82	0,78	0,76	0,86	0,92	1,00

Tableau 5. Matrice des corrélations sur les hauteurs mensuelles de pluies de 1995 à 2002. En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,05$ (test bilatéral)

	F1	F2	F3
Det Udom	15,237	1,969	9,353
Lam Dom Yaï SHS	13,077	38,639	16,816
Nam Yun	13,325	15,515	25,245
Na Chaluai	13,548	29,452	0,101
Buntarik	14,756	6,062	12,938
Ubon	15,169	4,240	13,808
Phibun	14,888	4,123	21,739

Tableau 6. Contribution des variables (%)

	F1	F2	F3
janvier	1,462	0,010	0,032
février	1,452	0,014	0,031
mars	1,281	0,003	0,023
avril	0,691	0,001	0,113
mai			
juin	0,167	4,983	0,178
juillet	3,541	33,369	0,599
août	0,000	2,317	1,108
septembre	1,534	1,257	24,348
octobre	0,050	2,737	3,450
novembre	0,629	0,093	0,304
décembre			
janvier	1,462	0,010	0,032
février	1,424	0,017	0,074
mars			
avril			
mai			
juin			
juillet	0,950	1,077	0,192
août	0,537	0,194	2,285
septembre	9,908	0,492	0,416
octobre	0,083	0,131	2,326
novembre	0,001	1,470	0,863
décembre	1,462	0,010	0,032
janvier	1,440	0,020	0,019
février	1,065	0,020	0,000
mars	0,778	0,280	0,198
avril	0,008	0,189	0,009
mai	0,050	0,146	0,353
juin	0,622	0,051	4,469
juillet	5,158	3,176	6,803
août	1,429	0,257	0,035
septembre	0,770	3,986	0,255
octobre	0,001	1,172	0,691
novembre	1,425	0,002	0,006
décembre	1,462	0,010	0,032
janvier			
février	0,473	1,059	0,741
mars	1,365	0,002	0,057
avril	0,125	0,240	0,665
mai	0,765	0,191	1,154
juin	0,000	0,271	3,619
juillet	0,061	0,528	0,000
août	1,413	0,116	0,610
septembre	0,215	0,934	4,087
octobre			
novembre	0,095	0,001	0,037
décembre	1,180	0,116	0,002
janvier	1,461	0,010	0,033
février	1,321	0,014	0,031
mars	0,127	0,067	0,334

avril	0,159	2,785	6,112
mai	0,500	2,796	4,667
juin	0,226	4,464	0,164
juillet	1,707	1,490	0,253
août	0,016	0,774	0,322
septembre	0,775	0,405	0,383
octobre	0,028	0,185	1,203
novembre	0,870	0,011	0,077
décembre	1,446	0,006	0,034
janvier	1,462	0,010	0,032
février	1,254	0,005	0,000
mars	1,338	0,000	0,017
avril	0,080	0,817	0,017
mai	5,921	0,082	3,134
juin	1,267	0,048	1,678
juillet	5,317	1,394	0,316
août	4,016	0,008	3,738
septembre	0,205	0,749	0,001
octobre	0,057	0,006	0,878
novembre	1,446	0,006	0,020
décembre	1,462	0,010	0,032
janvier	1,459	0,011	0,034
février	1,316	0,000	0,079
mars	0,031	0,213	0,395
avril	0,898	0,009	0,535
mai	0,018	0,001	1,600
juin	2,423	1,171	2,526
juillet	0,325	3,676	0,488
août	3,436	0,143	5,341
septembre	2,017	6,506	0,312
octobre	0,763	0,672	0,394
novembre	0,364	0,063	0,008
décembre	1,346	0,000	0,008
janvier	1,462	0,010	0,032
février	1,462	0,010	0,032
mars	0,884	0,248	0,465
avril	0,206	0,244	0,000
mai	0,009	1,394	0,691
juin	0,126	5,709	1,447
juillet	2,462	2,821	1,889

Tableau 7. Contribution des individus (%)

Annexes III. Questionnaire pour la première phase d'enquêtes réalisée en mars 2003

1. Perception de la variabilité des pluies

Qu'est ce qu'une bonne ou mauvaise année ?
(Caractérisation, identification de périodes particulières.)
Pouvez vous définir plusieurs types d'années ?

2. Stratégies d'adaptation

Comment réagissez vous en cas de mauvaise année ?
Y a-t-il un moyen pour minimiser les dégâts ?
Pouvez vous citer les années les plus mauvaises au cours des 10 dernières années ?
Pourquoi ces années étaient mauvaises et qu'avez vous fait , pourquoi ?
Est-il possible de prévoir si une année sera bonne ou mauvaise ?
Comment se prémunir contre cette incertitude ?

3. Perspectives d'amélioration

Avez vous pris des décisions particulières au cours des dernières années pour améliorer la situation ? Avez des projets ou des idées d'amélioration ?
Comment les réaliser ?

Annexes IV. Données sur les sols

Série et profondeur (cm)	Conductivité hydraulique à saturation (mm/j)
Korat	
0-19	222
19-61	168
Nam Phong	
0-18	351,6
18-45/56	76,2
Roi-Et	
0-19	102
19-38	63,6
38-50	115,2

Tableau 8. Valeurs de conductivité hydraulique à saturation mesurées par Akatanakul (1985) pour quelques séries de sol du nord-est de la Thaïlande.

Effect of subsoil compaction on saturated hydraulic conductivity across a range of subsoil clay content in farmers' fields of Det Udom district, Ubon Ratchathani province, NE Thailand, 1994WS

C0= uncompacted, C1= compacted, URRC= Ubon Rice Research Center
KSAT= Saturated hydraulic conductivity (Constant head method)

Field nb	Treatment	%clay content 30-55cm	KSAT mm/jour	Bulk density g/cm ³	Infiltration rate mm/jour
1	C0	1.4	5129		7488
1	C1	1.4	2708		3456
9	C0	2.1	1997	1.54	5472
9	C1	2.1	601	1.80	3168
5	C0	2.3	1837		5472
5	C1	2.3	537		3168
3	C0	2.6	1488		6336
3	C1	2.6	576		2736
2	C0	4.4	339		5472
2	C1	4.4	179		1872
10	C0	4.6	2348	1.47	2304
10	C1	4.6	627	1.54	1584
6	C0	10.9	194		6768
6	C1	10.9	13		5472
URRC*	C0	12.0	317	1.61	11952
URRC*	C1	12.0	98	1.73	5328

Tableau 9. Mesures de l'infiltration (infiltration rate) et de la conductivité hydraulique à saturation (KSAT) réalisées sur parcelles expérimentales au sud de la province d'Ubon Ratchathani.

Nom de la série et profondeur du sol	Paramètre B
Korat (0 à 18 cm de profondeur)	5808
Korat (19 à 61 cm de profondeur)	3297
Nam Phong (0 à 18 cm de profondeur)	39488
Nam Phong (18 à 45 cm de profondeur)	4820
Roi-Et (0 à 19 cm de profondeur)	2484
Roi-Et (19 à 38 cm de profondeur)	1385
Roi-Et (38 à 50 cm de profondeur)	2684

Tableau 10 : Estimation du paramètre B de la formule d'Ahuja/Williams pour les sols du nord-est de la Thaïlande.

Classe texturale	Conductivité hydraulique à saturation (mm/j)
sols sableux	500 à 2000
sols sablo limoneux	200 à 1000
sols limoneux	100 à 750
sols argilo-limoneux	5 à 150
sols argileux	1 à 50

Tableau 11 : Classes des sols et conductivité hydraulique à saturation théorique correspondante (FAO, 1990)

textural class	Clay [mass%]	Silt [mass%]	Sand[mass%]
Sand	0-10	0-15	85-100
Loamy sand	0-15	0-30	70-90
Sandy Loam	0-20	0-50	42-85
Loam	8-28	28-50	22-52
Silt Loam	0-28	50-80	0-50
Silt	0-12	80-100	0-20
Sandy clay loam	20-35	0-28	46-80
Clay loam	28-40	15-52	20-46
Silty clay loam	28-40	40-73	0-20
Sandy clay	35-55	0-20	45-65
Silty clay	40-60	40-60	0-20
Clay	40-100	0-40	0-45

Tableau 12. Correspondance entre classe texturale et composition texturale (USDA, 1991).

	Saturation maximale (cm ³ /cm ³)	Capacité au champ (cm ³ /cm ³)	Conductivité hydraulique à saturation (mm/j)
Korat			
réservoir « zone racinaire »	0,36	0,19	5386,80
réservoir « nappe »	0,40		1378,76
Roi-Et			
réservoir « zone racinaire »	0,39	0,27	1890,64
réservoir « nappe »	0,39		1829,75
Korat/Phon Phisai association			
réservoir « zone racinaire »	0,36	0,18	5232,56
réservoir « nappe »	0,43		508,54
Roi-Et/Phen			
réservoir « zone racinaire »	0,37	0,24	1761,80
réservoir « nappe »	0,37		1713,92
Nam Phong			
réservoir « zone racinaire »	0,34	0,21	1250
réservoir « nappe »	0,38		1250
Alluvial Complex			
réservoir « zone racinaire »	0,36	0,22	3104,36
réservoir « nappe »	0,39		1336,2

Tableau 13. Valeurs des paramètres hydrauliques des 6 séries calculées pour le modèle

Annexes V. Expériences sur la compaction des sols

Réf. (Harnpichitvitaya et al., 2000)

Level of ground water table depth in farmers' fields of Det Udom district
Ubon Ratchathani province, 1994WS
(ground water table depth in cm)

Day.

before/after

TP	Mean	SE	Field 1	Field 2	Field 3	Field 5	Field 9	Field 10
-42	44	26	15	70	39	59	11	69
-38	59	20	55	58	60	74	24	83
-32	68	24	50	93	62	79	34	91
-29	52	27	31	83	46	69	13	71
-22	19	15	6	36	7	33	2	29
-18	22	19	5	39	9	43	1	33
-15	4	4	0	6	2	11	0	6
-11	11	13	0	11	2	16	1	33
-8	5	7	3	0	3	0	7	19
0	7	9	7	0	0	0	9	24
10	5	7	7	0	0	0	4	17
13	4	6	8	0	0	0	3	14
17	18	21	22	16	1	5	7	57
20	3	3	3	0	0	0	7	7
24	1	2	0	0	0	0	0	6
27	2	4	2	0	0	0	0	10
31	1	3	0	0	0	0	0	8
34	2	4	0	0	0	0	0	10
39	2	5	0	0	0	0	0	12
41	1	2	0	0	0	0	0	5
45	1	2	0	0	0	0	0	6
48	2	4	2	0	0	0	0	9
52	2	4	0	0	0	0	0	10
55	3	4	0	5	0	0	0	10
63	5	10	3	0	0	0	1	26
68	11	23	4	2	0	1	2	58
69	4	6	5	0	0	0	1	15
73	17	23	17	12	0	5	4	62
77	35	29	39	57	2	13	18	79
80	43	22	58		38	45	31	87
83	70	17	66		61	57		94
87	71	3	74		71	68		
91	86	10	82		78	97		
95	85	1			85	84		

Tableau 14. Relevés piézométriques

La date est indiquée dans la première colonne en nombre de jours avant ou après la date repiquage (cf. Tab 15).

File: DET-Crop calendar 1994

FIELD Treatment	Repiquage	fertilize1	fertilize2	flowering	harvest
1 A	28-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
B	28-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
C 1	28-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
C 2	28-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
2 A	08-août	06-sept	22-sept	25-oct	30-nov
B	08-août	06-sept	22-sept	25-oct	30-nov
C 1	08-août	06-sept	22-sept	25-oct	30-nov
C 2	08-août	06-sept	22-sept	25-oct	30-nov
3 A 1	28-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov
A 2	28-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov
C 1	28-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov
C 2	28-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov
5 A	08-août	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
B	08-août	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
C 1	08-août	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
C 2	08-août	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
9 A	29-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
B	29-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
C 1	29-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
C 2	29-juil	06-sept	22-sept	27-oct	30-nov
10 A	29-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov
B	29-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov
C 1	29-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov
C 2	29-juil	06-sept	22-sept	29-oct	30-nov

Tableau 15. Calendrier cultural pratiqué dans les parcelles où les mesures piézométriques ont été prises. (cf. tab. 14)