

prévention des inondations et drainage le cas de l'Asie du Sud-Est

W.F.T. VAN ELLEN

1. Introduction

Cet exposé traite des problèmes causés par l'excès d'eau en Asie du sud-est et de la contribution que la science et la technologie peuvent apporter à des solutions spécifiques aux deltas et aux zones rurales à haute densité démographique de la région. Lorsque l'on évoque les zones deltaïques de l'Asie du sud-est, les deltas sont associés aux inondations, à la surpopulation, à l'agriculture de subsistance et à la pauvreté. On se trouve alors face à ce paradoxe : de fortes concentrations de population dans des régions qui ne paraissent pas susceptibles de subvenir à leurs besoins dans des conditions raisonnables.

Sans minimiser la variété des situations dans les deltas de l'Asie du sud-est,

l'exposé est agencé autour des assertions suivantes :

- les deltas ont toujours été soumis aux inondations et n'en seront jamais totalement délivrés,
- les deltas ont toujours abrité de fortes concentrations de population et il en sera toujours ainsi,
- les deltas ont été et continueront d'être des centres d'activités économiques dont la principale est pour l'instant l'agriculture,
- les deltas sont parfaitement adaptés à une mise en valeur naturelle,
- les deltas ont besoin des apports de la science et de la technologie pour leur mise en valeur future.

Dans cet exposé, le Bangladesh est inclus dans l'Asie du sud-est, -dont en réalité la limite occidentale est la Birmanie- car le delta du Bangladesh est typique des problèmes et des potentialités des deltas de la région.

2. Les deltas

L'Asie du sud-est recèle les deltas de quelques uns des plus grands fleuves du monde (**Tableau 1**).

Le nom «delta» vient de la forme triangulaire de celui du Nil semblable à la lettre grecque delta. Il désigne la plaine alluviale formée à l'embouchure du fleuve où le courant perd sa vitesse et abandonne une partie de sa charge en sédiments. La forme réelle d'un delta dépend de nombreux facteurs externes tels que la géomorphologie, les marées et les courants. Son processus de formation s'opère en fonction de l'écoulement du fleuve qui achemine eau et sédiments vers la mer. Formation naturelle, le delta est une entité vivante dont l'évolution résulte d'un équilibre subtil entre ses éléments constitutifs. Aussi toute intervention de l'homme dans un tel environnement doit-elle être particulièrement bien conçue et ses effets positifs ou négatifs, à court ou à long terme, minutieusement évalués.

3. Les deltas et les inondations

Les deltas ont toujours subi des inondations et, quelles que soient les mesures prises, ils n'en seront jamais entièrement délivrés. Des inondations peuvent survenir

n'importe où mais particulièrement dans les deltas, partie la plus basse des fleuves. La cause de ces phénomènes est climatologique avec l'occurrence de pluies intenses dans le delta conjuguée avec celle de débits et niveaux d'eau élevés dans le fleuve, engendrés à leur tour par des précipitations massives ou des fontes de neige exceptionnelles (ou bien une combinaison des deux) sur le bassin versant amont, le tout associé à des surélévations du niveau marin (du fait de vents violents ou de raz-de-marée). Les caractéristiques extrêmes de tels phénomènes ne peuvent être estimées que par une approche probabiliste qui implique qu'il est impossible de définir un maximum absolu pour les diverses causes d'inondations et, partant, pour les inondations elles-mêmes. Aussi extrême que soit la puissance qu'ait pu atteindre une

rivières	superficie du bassin versant (en million de km ²)	écoulement	moyen
		débit (en m ³ /s)	lame d'eau équivalente (en mm/an)
Gange	1	14.000	440
Mekong	0, 8	15.000	590
Brahmapoutre	0, 64	19.000	940
Irrawaddy	0, 41	13.000	1.000
Chao Fhya	0, 16	960	190

Tableau 1

Les grands fleuves de l'Asie du Sud-Est

inondation, il est toujours possible qu'il s'en produise une plus forte encore. Les estimations d'événements extrêmes et de leur intensité s'effectuent donc par analyse statistique. L'ajustement d'une courbe adéquate sur une représentation graphique des phénomènes extrêmes annuels classés par importance permet d'obtenir, par extrapolation, des estimations de valeurs d'événements correspondant à des fréquences ou probabilités d'occurrence exceptionnellement basses. Les ouvrages de protection d'un delta sont actuellement conçus sur la base d'un risque accepté d'accident ou de submersion mais, aussi faible que soit la probabilité correspondant à ce risque, une inondation encore plus dévastatrice peut toujours se produire. Si les aménagements de delta aux Pays-Bas ont été conçus pour un risque moyen d'un accident en 10.000 ans, une submersion plus importante peut survenir aussi bien demain que dans 10.000 ans !

Si l'on considère le profil en long du cours inférieur du Brahmapoutre au Bangladesh représenté sur la **figure 1**, avec l'indication du niveau moyen des terres riveraines ainsi que celui des hautes eaux dépassé pendant 5% du temps en moyenne, il apparait clairement que, près de la côte, les hautes eaux dans le cours inférieur du Brahmapoutre sont dues à des surélévations de niveaux de la mer causées par des cyclones dans le golfe du Bengale qui, en se dirigeant vers le littoral, produisent une onde de submersion pouvant atteindre 6 à 9 mètres qui recouvre la zone côtière du delta. Habituellement l'inondation ne dure pas longtemps mais ses effets peuvent être graves en raison de la salinité de l'eau. De semblables catastrophes provoquées par des typhons peuvent également se produire le long des côtes du Vietnam et des Philippines. En remontant vers l'amont, les effets de l'inondation causée cette fois-ci par les hauts niveaux du fleuve vont s'intensifiant. Dans ce cas, la hauteur de submersion peut atteindre 2 à 3 mètres. Il faut tenir compte du fait qu'avant la montée du niveau du fleuve, des pluies reçues directement par le delta ont déjà pu causer des inondations considérables dans les terres les plus basses. En remontant plus encore en amont, la fréquence des inondations décroît lorsque, quittant la plaine alluviale, on aborde le rétrécissement de la vallée : si les berges du fleuve peuvent encore être submergées, les terrasses plus élevées ne le sont généralement pas.

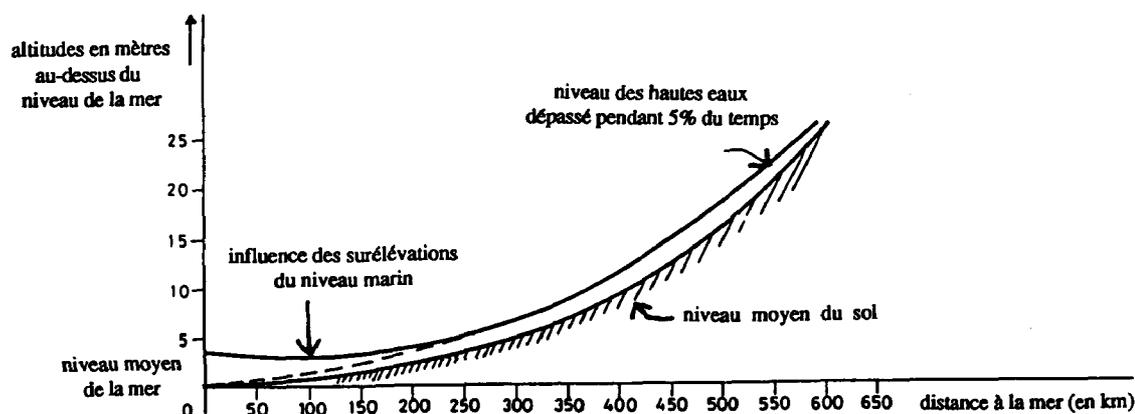


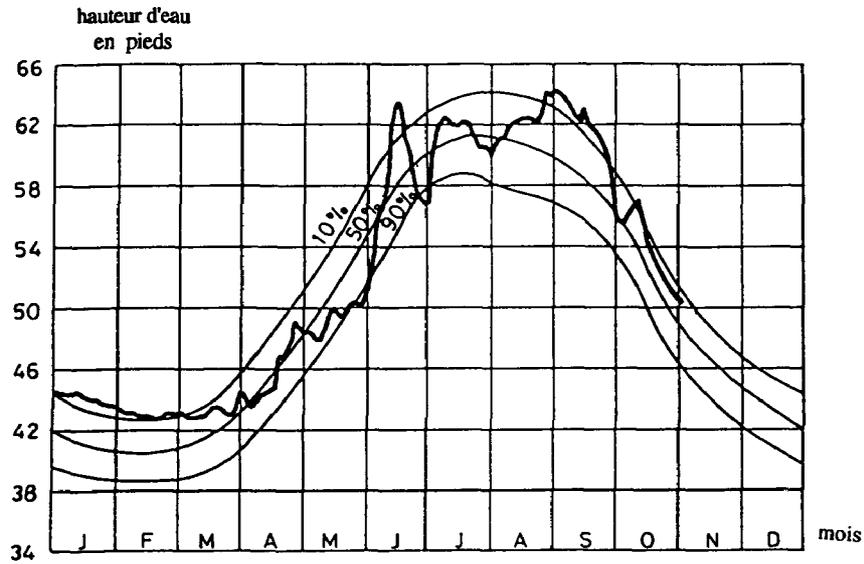
Figure 1

Profil en long du cours inférieur du Brahmapoutre au Bangladesh

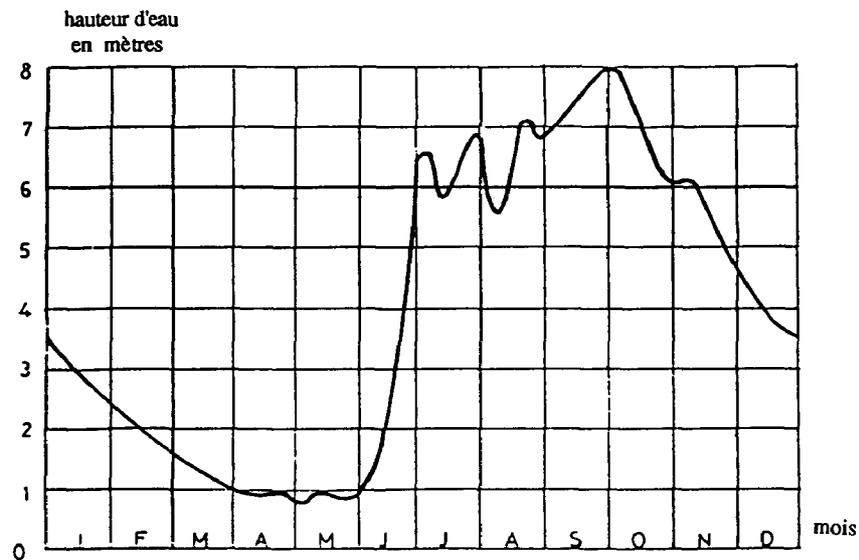
Ce mode d'inondation concerne grosso modo tous les deltas, mais il ne faut pas oublier que les crues peuvent se produire n'importe où, dans et hors des deltas.

En règle générale, l'homme ne peut aménager son environnement avec une garantie absolue contre les inondations.

Les hydrogrammes des principaux cours d'eau de la région accusent des écarts considérables entre niveaux des hautes et basses eaux qui sont indicatifs de



hydrogramme du Brahmapoutre à Bahadurabad en 1966



hydrogramme du Mékong à Pnom-Penh en 1965

Figure 2

Hydrogrammes de grand fleuves de l'Asie du Sud-Est

la hauteur des submersions éventuelles : de même que la durée des hautes eaux est une indication de la persistance des crues (figure 2). De nombreuses rivières de la

région présentent des hydrogrammes de forme tout à fait différente. En particulier celles qui ont un bassin versant montagneux à fortes pentes peuvent réagir de façon très violente aux précipitations reçues par le bassin supérieur. Il en résulte des crues "éclair" (banjirs) avec des pointes relativement élevées mais dont les durées sont toujours brèves. La **figure 3** indique l'extension des inondations et la distribution des hauteurs moyennes des submersions dans le delta du Mékong : les variations annuelles autour de ces valeurs moyennes peuvent, bien entendu, être considérables. On notera également l'intrusion profonde de l'eau salée à l'intérieur du delta pendant les périodes de basses eaux.

4. Les deltas et l'habitat humain

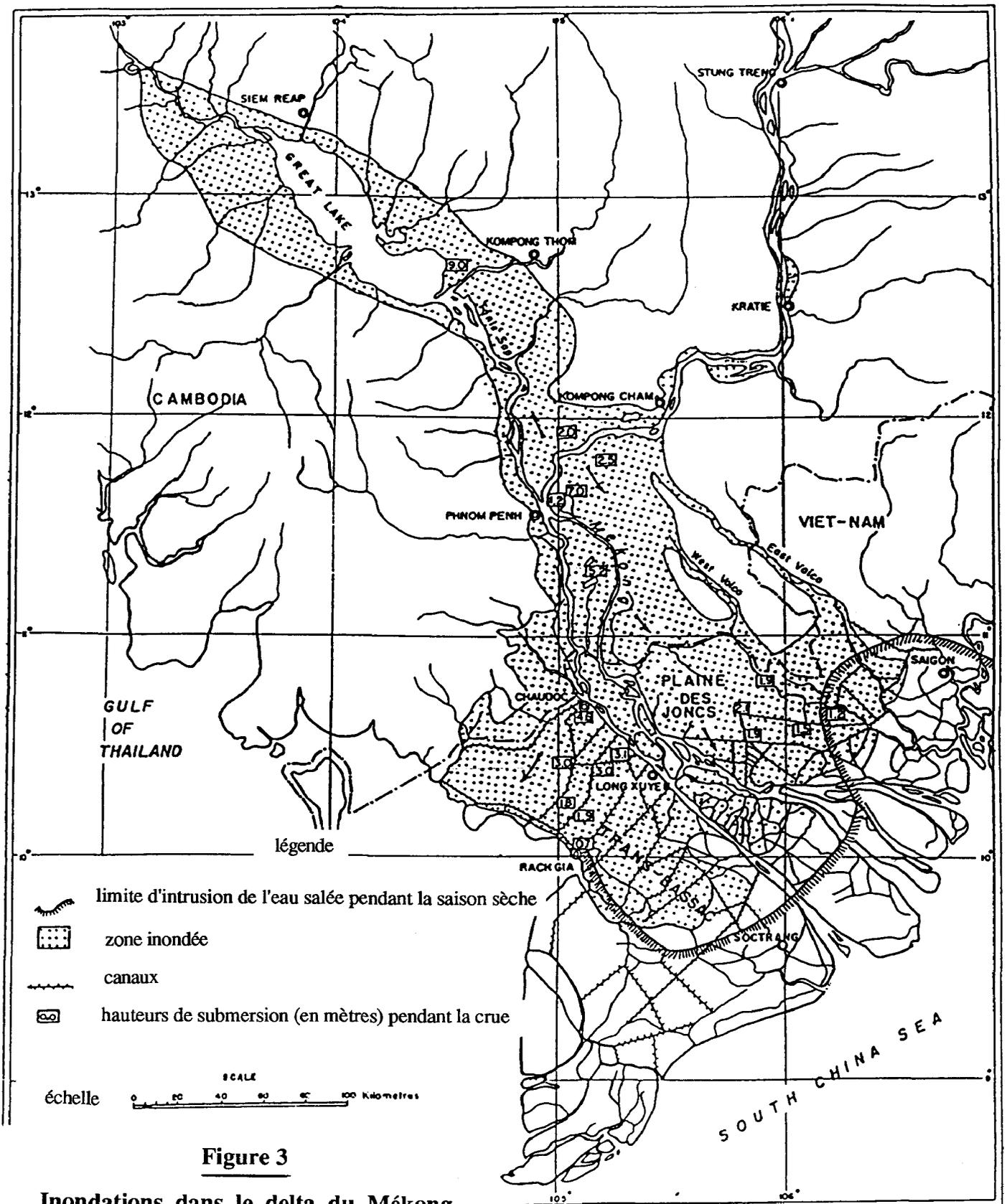
En tous lieux et de tous temps les deltas ont attiré les peuples : des civilisations anciennes, -certaines encore existantes-, y ont eu leur berceau, la civilisation égyptienne en premier lieu. Cette attraction résulte de ce que le sol des deltas est généralement très fertile et, de plus, régulièrement enrichi par les crues ; l'eau douce s'y trouve également en abondance tout au long de l'année tandis que le réseau des voies fluviales facilite le transport des hommes et des marchandises.

pays	superficie (km ²)	population (millions)		densité démographique (hab. au km ²)	
		1965	1984	1965	1894
Bangladesh	144.000	60,2	98,1	420	680
Birmanie	677.000	24,7	36,1	40	50
Thaïlande	514.000	30,7	50,0	60	100
Vietnam	330.000	-	60,1	-	180
Philippines	300.000	32,9	53,4	110	180
Indonésie	2.027.000	104,9	158,9	50	80

Tableau 2

Evolution de la population de l'Asie du Sud-Est

Les deltas d'Asie du sud-est ne manquent pas à la règle: une importante partie des populations nationales y vit. Si l'on considère l'évolution démographique de la région (**tableau 2**), les chiffres bruts masquent le fait que la densité de population



des deltas est en règle générale plus élevée que celle des pays entiers. Le cas du Bangladesh, considéré comme entièrement deltaïque, justifie cette assertion.

La population de l'Asie du Sud-Est va encore augmenter considérablement dans les prochaines décennies (**tableau 3**) et l'on peut s'attendre à ce que cette augmentation contribue, en premier lieu, au développement des centres urbains bien que l'accroissement de population des zones rurales se poursuive à un taux relatif moindre (**tableau 4**). Dès lors que la capacité d'accueil des basses régions deltaïques peut être estimée supérieure à celle des zones d'altitude plus arides en dépit d'une densité déjà très élevée la population des deltas augmentera pendant un certain temps encore.

5. Les deltas et la protection contre les crues

Afin d'accroître la capacité des deltas à subvenir aux besoins moyens de subsistance d'une population en expansion, l'homme a dû transformer considérablement son environnement physique. Ainsi, dans le delta du Bangladesh, la diversité des conditions a imposé la mise en oeuvre de techniques différenciées de protection des populations et des cultures contre les aléas des crues :

- la construction de digues basses dans la zone intertidale, entreprise au siècle dernier ou même avant, se poursuit par la construction systématique de digues côtières qui a débuté il y a 25 ans seulement. Ces digues n'ont pas été prévues pour résister aux assauts des cyclones mais pour contenir les hautes marées normales, causes d'intrusions salines, ce qui a sans aucun doute un effet bénéfique. Cependant, de tels endiguements présentent certains effets négatifs pour l'agriculture en ce qu'ils font obstacle à l'écoulement des excès d'eau et aux entrées d'eau en période de pénurie, et d'autre part en empêchant l'inondation périodique des terres par la marée, il s'opère un envasement rapide des chenaux à marée.

- des digues latérales ont été construites, plus en amont, le long du Gange et du Brahmapoutre. Bien que présentant jusqu'à un certain point les mêmes problèmes que les remblais littoraux, leur effet d'ensemble peut être considéré comme globalement positif. Une discussion s'est engagée pour savoir jusqu'à quel point l'endiguement du fleuve contribue à accroître les niveaux d'eau maxima. Endiguer le fleuve sur une rive et, a fortiori, sur les deux rives aboutit obligatoirement à ce résultat. Les études effectuées montrent cependant qu'un fleuve endigué s'adapte

pays	taux moyen annuel d'augmentation de la population (%)			hypothèse d'une population stationnaire	
	1956-73	1973-84	1980-2000	taille (millions)	années
Bangladesh	2,6	2,5	2,4	310	2030
Birmanie	2,3	2,0	2,1	94	2020
Thaïlande	2,9	2,2	1,7	110	2005
Vietnam	3,1	2,6	2,5	167	2015
Philippines	2,9	2,2	1,7	137	2015
Indonésie	2,1	2,3	1,9	368	2010

Tableau 3

Augmentation de la population de l'Asie du Sud Est

pays	population urbaine (millions)		population rurale (millions)	
	1965	1984	1965	1984
Bangladesh	3,6	17,7	56,6	80,4
Birmanie	5,2	10,5	19,5	25,6
Thaïlande	4,0	9,0	26,7	41,0
Vietnam	-	12,0	-	48,1
Philippines	10,4	20,8	17,7	32,6
Indonésie	16,8	39,7	104,4	119,2

Tableau 4

Répartition des populations urbaine et rurale de l'Asie du Sud-Est

pays	indice moyen de production alimentaire par habitant (1982-84) (l'indice 100 correspond à la période 1974-76)
Bangladesh	99
Birmanie	124
Thaïlande	115
Vietnam	123
Philippines	107
Indonésie	120

Tableau 5

**Augmentation de la production alimentaire
des pays de l'Asie du Sud-Est**

relativement rapidement aux nouvelles conditions en augmentant par érosion la section d'écoulement de son lit. La surélévation des hauts niveaux d'eau résultant de l'endiguement ne sera donc pas trop importante. Par contre, l'érosion profonde des berges dans les sinuosités du cours du fleuve fait peser une menace permanente sur la longévité des endiguements mis en place.

- un troisième type intéressant d'endiguement a été créé dans la partie nord-est du Bangladesh constitué de terres basses profondément submergées pendant la mousson. Après la décrue des eaux, l'agriculture tire profit de la teneur en humidité résiduelle des sols, mais l'écoulement des eaux provenant du bassin supérieur peut encore menacer les cultures en place. Des dispositifs de levées submersibles, fermés en aval et ouverts en amont, retiennent alors les eaux dans la dépression ainsi créée pendant une durée suffisante pour que les récoltes soient épargnées.

Des levées anti-inondation ont également été construites dans le delta de l'Irrawaddy. Ces dispositifs, en forme de fer à cheval, sont fermés en amont et ouverts sur l'aval, à l'inverse de ceux du Bangladesh. Ils présentent l'avantage de ne pas faire obstacle au drainage de la partie amont de la zone endiguée. Ils offrent en outre aux crues une capacité d'emmagasinement qui contribue à écrêter les niveaux d'eau maximaux, les fortes crues pouvant toujours pénétrer dans la zone protégée par l'extrémité aval ouverte. La reconstruction, actuellement en cours, d'une partie des endiguements latéraux du fleuve en mauvais état a ravivé le débat sur les mérites des digues ouvertes : on ne peut toujours pas affirmer de façon définitive si l'endiguement des deux rives a pour effet de surélever les niveaux d'eau dans le lit du fleuve et, si oui, à quel point. Dans le même temps, ont été établis des projets de barrages réservoirs sur les cours supérieurs de l'Irrawaddy et de ses affluents. Selon l'importance relative du bassin contrôlé ils auront un effet réducteur sur les débits et les niveaux d'eau maximaux à l'aval.

En Thaïlande, les pluies dans le delta du Chao-Phya sont souvent insuffisantes pour les cultures, néanmoins le problème des crues dans la plaine centrale du delta du Chao Phya au nord de Bangkok est relativement compliqué. Lorsque les niveaux du fleuve sont exceptionnellement hauts, une partie significative de l'écoulement ne peut plus être évacuée par le Chao Phya et, dans la partie sud de la plaine centrale, les digues sont emportées. L'eau de crue du Chao Phya et l'eau des pluies torrentielles reçues par la plaine centrale sont ainsi temporairement emmagasinées dans des zones d'accumulation. Mais si l'on surélève les digues

pour prévenir les inondations, on fera par là même monter dangereusement le niveau de l'eau dans la région de Bangkok : une solution consisterait en la création de capacités d'accumulation supplémentaires à l'amont, ce qui est techniquement possible, encore que l'intérêt économique en soit encore à démontrer.

Le cours aval du Mékong n'est pas protégé et presque toute la région est inondée plus ou moins profondément suivant la distance de la côte. Les débits du bas Mékong sont commandés par le Grand Lac qui sert de réservoir régulateur naturel en amont de Pnom Penh (figure 3).

En complément à cette vaste entreprise de valorisation des basses régions de l'Asie du sud-est, il faut parler de l'aménagement des basses terres d'Indonésie. Bien qu'il ne s'agisse pas vraiment de deltas, les aménagements qui s'y poursuivent doivent ici retenir notre attention. Pour différentes raisons, en rapport avec la surpopulation de l'île de Java et avec la nécessité d'augmenter la production alimentaire pour une population en croissance rapide, l'Indonésie a entrepris un programme de valorisation de plus d'un million d'hectares de basses terres qui se sont formées principalement sous l'action de la mer, le long des côtes de Sumatra, Kalimantan et Irian Jaya., à partir de sédiments fluviaux arrachés aux montagnes de l'intérieur. Les problèmes à surmonter pour cette mise en valeur sont gigantesques. Communs à tout projet d'aménagement à grande échelle, ils sont aggravés par des difficultés spécifiques aux basses terres de la côte : sol tourbeux et avec acidification potentielle par les sulfates, intrusion saline, subsidence, défaut de voies de communication, pénurie d'eau potable, etc... Enfin le souci de préserver l'environnement existant - naturel, social et culturel -, ajoute ses propres contraintes aux actions envisagées.

6. Les deltas et l'agriculture

L'objectif immédiat de l'intervention humaine dans l'environnement deltaïque, tel que nous l'avons décrit, est la mise en valeur des terres agricoles. A cet égard, le riz est une denrée bien adaptée aux conditions prévalentes dans ces zones. Le riz flottant peut être cultivé dans les régions soumises à des submersions d'un maximum de 3 à 5 m car sa tige est longue de 4 à 5 m, mais son rendement ne dépasse pas en moyenne plus de 1 à 1,5 tonne par hectare. L'Institut International de Recherche sur le Riz à Los Banos aux Philippines travaille à son amélioration.

En outre, grâce aux effets de l'endiguement et d'une meilleure gestion de l'eau, d'autres variétés de riz à plus haut rendement ont été introduites et de ce fait la production alimentaire de la région a augmenté parallèlement à son évolution démographique (cf. tableau 5). En comparant les rendements de production du riz dans les divers pays à l'évolution des rendements obtenus au Japon en fonction d'un certain nombre de facteurs de production (figure 4), des gains substantiels de productivité de cette denrée sont encore possibles dans tous les pays concernés.

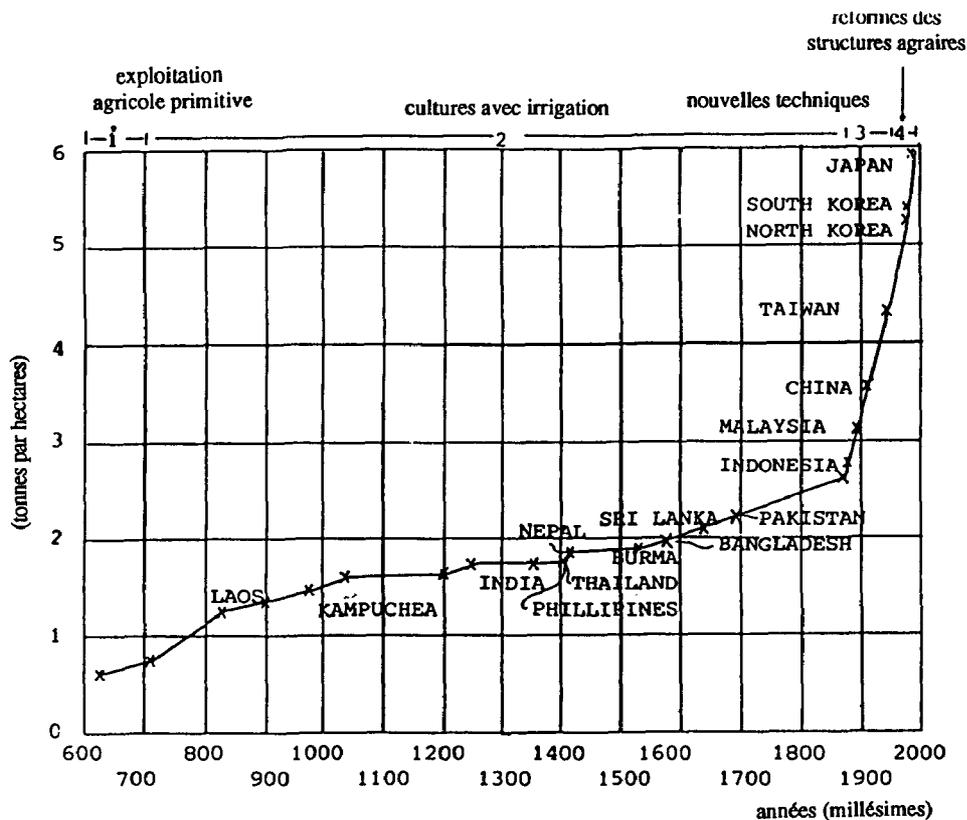


Figure 4

Evolution historique de la production de riz au Japon comparée aux productions actuelles des autres pays de l'Asie du Sud-Est

Du point de vue de la production agricole, on distingue deux catégories de pays au Sud-Est asiatique : d'une part un groupe de pays qui doit encore accroître sa production alimentaire et d'autre part des pays ayant atteint une autosuffisance alimentaire qui entreprennent des cultures diversifiées. Le Bangladesh et les pays d'Indochine appartiennent à la première catégorie tandis que la Birmanie, la Thaïlande et, dans une certaine mesure, l'Indonésie sont traditionnellement exportateurs de riz.

L'Indonésie a atteint récemment le niveau d'autosuffisance : les années à venir diront si cette situation a un caractère permanent. Les autres pays de la région, encore importateurs, peuvent espérer devenir autosuffisants voire même exportateurs dans un proche avenir.

7. L'avenir des deltas

La mise en valeur future ne sera pas identique pour tous les deltas, mais on peut dégager certaines tendances - valables en grande partie pour l'ensemble de ces zones - qui se résument ainsi :

- a. la population des deltas doit continuer à augmenter dans les années à venir
- b. la production alimentaire, en grande partie concentrée dans les deltas, va s'intensifier. En d'autres termes, l'activité économique de ces régions et la valeur économique des terres augmenteront ;
- c. à brève échéance pour les uns et dans un avenir plus lointain pour tous, priorité sera donnée à la diversification des productions agricoles.

Les points (a) et (b) exigent un haut degré de sécurité pour l'homme et ses biens. Il faut être conscient qu'à l'heure actuelle, la décision de savoir si les mesures de protection contre les inondations doivent être prises ou non, dépend en grande partie de considérations économiques. Le coût de ces mesures doit être comparé aux bénéfices attendus, c'est-à-dire une activité économique intensifiée et une production agricole accrue. Cependant, avec l'accroissement démographique, d'autres considérations vont jouer un rôle de plus en plus important. Ainsi en raison du progrès économique, la valeur des vies humaines est estimée à un plus haut prix. Ce qui signifie qu'avec un niveau économique et social plus élevé, une communauté peut consentir à investir ses ressources dans des projets qui ont avant tout pour but d'accroître la sécurité des personnes et des communautés dans leur ensemble. Il s'ensuit que, dans l'avenir, il y aura une demande accrue d'une plus grande sécurité pour la population. En prenant certaines mesures parmi lesquelles la protection des terres fertiles par endiguement et la stabilisation des berges des rivières. L'amélioration de la sécurité devra s'opérer par étapes, en parallèle avec l'accroissement de la population et des activités économiques.

Le point (c) exige une amélioration de la gestion de l'eau, problème complexe qui concerne à la fois la saison sèche, où l'irrigation est nécessaire à la production agricole, et la saison humide, où la prévention des inondations et le drainage des excès d'eau sont des préalables nécessaires à toute agriculture intensive. L'amélioration du drainage signifie que, sur toute zone protégée des inondations externes, un système de drainage interne approprié doit être mis en place pour évacuer l'excédent des précipitations. Des considérations économiques permettent de savoir si cet excès d'eau peut être évacué par gravité à marée basse, lorsque cela est possible, ou bien si un pompage est nécessaire et justifié. La prévention des inondations a été discutée précédemment dans le contexte de construction de digues pour parer aux submersions. L'avenir ne consistera pas nécessairement en une extrapolation du passé. Il a été brièvement fait mention des effets négatifs de l'endiguement dans les régions intertidales. Il se pourrait que la combinaison d'une amélioration de la gestion de l'eau et de la protection contre les inondations dans le delta fasse appel à une stratégie plus volontariste. En fermant les criques à marées on peut atteindre d'un coup plusieurs objectifs : les régions de l'intérieur peuvent ainsi être protégées des effets des tempêtes sans qu'il soit nécessaire de construire ni de renforcer les digues autour de zones particulières et, par ailleurs, on peut créer des réservoirs d'eau douce à l'intérieur de certains polders dans le cadre d'un aménagement intégré. On peut donc imaginer qu'un jour les deltas de l'Asie du sud-est présenteront des analogies de structure avec la partie sud ouest des Pays-Bas où le dernier ouvrage important de protection contre les effets des tempêtes a récemment été mis en service. Ces aménagements constituent par ailleurs une pièce maîtresse du système de gestion des eaux d'une grande partie du pays. Les étapes par lesquelles un tel but doit être progressivement atteint différeront dans chaque delta suivant ses particularités physiques, la finalité assignée aux aménagements, leur cadence de réalisation et la politique à long terme des gouvernements.

Une chose est encore à ajouter aux perspectives de mise en valeur à long terme des deltas du Sud-Est Asiatique. Actuellement, l'activité économique y est avant tout agricole, il en sera ainsi pour les décennies à venir. De nombreux indices montrent, en ce moment, que l'agriculture est le pivot de la mise en valeur de ces zones et doit être le générateur de l'épargne permettant d'investir dans d'autres secteurs de l'économie. Les industries qui soutiennent l'agriculture et les industries agro-alimentaires peuvent être les bases d'une saine mise en valeur industrielle. Un jour ou l'autre, l'industrie et les services occuperont une place plus marquée dans

ces régions. Les deltas satisfont parfaitement aux conditions préalables à tout développement industriel : ils sont d'ordinaire bien approvisionnés en eau douce à usage domestique et industriel et les rivières constituent des voies d'accès aussi bien vers l'intérieur du pays que vers le monde extérieur. Il existe, bien entendu, d'autres conditions à satisfaire pour l'essor de toute industrialisation moderne : développer l'arrière pays et l'exploitation des ressources naturelles, disposer de voies d'eau menant à la mer suffisamment profondes sans nécessiter trop d'entretien annuel, etc... On peut donc espérer que, dans l'avenir, les deltas continueront à jouer un rôle clef dans le développement des pays du Sud-Est Asiatique grâce à leurs avantages naturels inhérents et malgré les quelques désavantages qu'ils présentent actuellement.

8. Les deltas, la science et la technologie

Tout bien considéré, ni la science ni la technologie ne vont déterminer à elles seules la mise en valeur future des deltas de la région. La stratégie en sera tout d'abord définie par des facteurs externes liés à l'économie mondiale dans son ensemble et par des décisions de politique intérieure. Les facteurs externes concernent les prix de l'énergie et des produits de base, l'inflation mondiale, les taux d'intérêt, etc... Les décisions de politique intérieure visent les priorités accordées à l'urbanisation ou au développement rural, les prix de produits agricoles, les taxes et les subventions, etc... La science et la technologie interviennent seulement en tant qu'outils dans le processus choisi, mais leur rôle est important aux différents stades d'une mise en valeur continue et dynamique.

On mentionnera ici quelques uns des domaines dans lesquels la science et la technologie doivent apporter une contribution appréciable :

- aucune mise en valeur n'est possible sans bases de données fiables et tenues à jour. Ces données concernent les ressources en terre en eau et d'autres informations essentielles. Les techniques d'utilisation de l'imagerie et de transmission satellitaires offrent ici des possibilités nouvelles d'acquisition d'un flux continu d'informations. On dispose de dispositifs performants pour recueillir et stocker les données sur les précipitations et les hauteurs d'eau, qui peuvent être reliés à l'ordinateur pour la mise en mémoire et le traitement de grandes quantités de données.

- au stade de la planification et de la mise en valeur, un delta doit être considéré comme un tout cohérent et l'on ne peut se permettre d'étudier ses projets d'aménagement hors de ce contexte. Mais ce n'est pas suffisant car le delta est aussi partie intégrante du bassin du fleuve. Tout changement majeur affectant les ressources en eau et les terres dans le bassin a des répercussions dans le delta. Ceci concerne non seulement le régime des hautes et des basses eaux mais aussi tous les aspects, tant quantitatifs que qualitatifs, de l'écoulement du fleuve. Dans les futures opérations de planification, il faudra prendre en compte les bassins versants considérés dans leur ensemble. A ceci vient s'ajouter un facteur de complication, car beaucoup de cours d'eau qui forment des deltas sont des fleuves internationaux. L'utilisation optimale des ressources hydriques du bassin exige donc une étroite coopération internationale et, dans ce domaine, il y a malheureusement plus d'exemples d'échecs que d'opérations réussies !

- la science et la technologie ont favorisé le développement d'outils et de méthodologies pour le traitement des systèmes complexes et la simulation de diverses stratégies d'exploitation. Différents modèles de calcul sur ordinateur peuvent être utilisés pour simuler l'incidence que peuvent avoir les interventions de l'homme sur l'environnement du delta. Ces modèles doivent être constamment ajustés et affinés pour être représentatifs de la situation réelle et fournir des résultats cohérents avec les décisions à prendre. Au départ, on établira un modèle global de l'ensemble du bassin du fleuve et du delta, et ensuite des modèles particuliers plus détaillés de la zone à aménager : leur mise en oeuvre combinée permet de comparer les incidences des solutions proposées. Si l'on envisage des problèmes plus spécifiques de mise en valeur des deltas, il faudra faire face à de nouvelles contraintes de conception et de construction d'ouvrages. La science et la technologie devront fournir ici des méthodologies appropriées telles que des modèles physiques et mathématiques adaptés à l'évaluation de la faisabilité des projets et à la mise au point de techniques d'aménagement convenables. Il en sera ainsi par exemple, lorsqu'il faudra aménager des zones où des ouvrages doivent être établis sur des couches de fondation soumises à l'érosion et où roches et pierres ne sont pas facilement disponibles pour les travaux de protection.

- une fois mise en place, toute nouvelle installation doit être gérée à partir d'informations exactes et tenues à jour sur les ressources disponibles, les besoins réels à satisfaire et l'efficacité recherchée. Des modèles seront encore ici des outils de gestion efficace. La qualité des résultats dépend ici directement de la compétence

des scientifiques et des techniciens qui conçoivent et exploitent le système. Si une aide de l'étranger est utile dans la phase initiale des projets et par conséquent est bien accueillie, il faudra progressivement faire appel aux ressources humaines locales pour subvenir aux besoins de cette mise en valeur. C'est pourquoi un effort continu d'éducation et de formation s'avère ici indispensable : toutes les formes de coopération dans le domaine de la science, de la technologie et de la formation professionnelle doivent être encouragées.

W.F.T. VAN ELLEN
Professeur à l'Institut International des Techniques
Hydrauliques et Environnementales (Pays-Bas)