

P.S. Au moment de mettre sous presse, nous apprenons qu'un fascicule très intéressant se rapportant aux tempêtes vient de paraître: L'année 1995 y est considérée comme l'année de tous les cyclones. Cette brochure en couleur présente de façon particulièrement didactique l'activité cyclonique observée en 1995 et la description d'un cyclone tropical. Elle livre également des

informations sur le vent, la pluie, la houle et la marée qui lui sont associés. Quelques indications sont données à propos de leur prévision.

Référence: MÉTÉO-FRANCE, 1995. 1995, L'année de tous les cyclones, Direction Interrégionale Antilles Guyane, novembre, 39 p., ISBN 2-11-085 174-0.

4. LES TYPES DE CRUES ET LEUR RÉPARTITION LES MOYENS DE LUTTE CONTRE LES INONDATIONS

François PETIT

I. INTRODUCTION

Historiquement les inondations ont constitué la pire des calamités naturelles par le nombre de victimes. Toutefois, elles sont très inégalement réparties à la surface du globe, comme il ressort du tableau I où est présentée une synthèse des victimes et des dégâts occasionnés par les inondations depuis le milieu du XIXe siècle. Sont donc exclues de ce tableau, les grandes inondations historiques, telles celles du Danube en 1342 qui fit plus de 6000 victimes, ou encore les inondations qui ont affectés la Chine avant le siècle dernier.

En un peu moins d'un siècle et demi, plus de 5 millions de personnes ont péri du fait des inondations, sans compter les victimes indirectes dues aux famines et aux épidémies, qui en résultent. La grande majorité de ces victimes sont dénombrées en Chine, presque exclusivement du fait de deux fleuves, le Hoang Ho (le Fleuve Jaune) et le Yang Tsé Kiang. Par contre, aux USA, où le Mississippi a pourtant un champ d'inondation (90.000 km²) au moins aussi important que celui de ces deux fleuves, on ne dénombre que 4500 victimes. Le Mississippi et ses deux principaux affluents, le Missouri et l'Ohio, n'interviennent cependant que pour le tiers de ces victimes, la majorité d'entre elles étant le fait de crues éclaircies dues à des pluies de forte intensité, étroitement localisées et affectant des bassins de moindre importance. En Europe méditerranéenne, tout comme dans le continent Sud-Américain, la presque totalité des victimes résultent également de ce dernier type de crues.

Si on considère la répartition des dégâts occasionnés par les inondations, on note une énorme distorsion vis-à-vis de la répartition des victimes. En effet plus du tiers des dégâts enregistrés dans le monde sont répertoriés aux USA. Ceci résulte surtout de la différence de standing de vie mais aussi d'un manque d'informations du fait que la Chine ne participe pas aux échanges internationaux de réassurance d'où proviennent ces chiffres. Aux USA, on a estimé que de 1925 à nos jours, plus de 50 % des dégâts résultaient des inondations du Mississippi supérieur et de ses affluents, le Mississippi inférieur n'intervenant que pour 10 % des dommages. Cette situation est le fruit de la politique anti-inondation menée sur cette partie du fleuve depuis le milieu du XIXe siècle et dont nous envisagerons plus de détail par la suite.

On se retrouve donc en présence de deux types de crues diamétralement opposées, à la fois par leur genèse, par leur propagation et par l'espace qu'elles affectent. Ceci ressort de la figure 1, où sont combinées à la fois la dimension spatiale et l'échelle temporelle des différents événements hydroclimatiques susceptibles de provoquer des inondations. Ainsi une cellule orageuse génératrice de pluies de très forte intensité peut avoir un diamètre de l'ordre de 10 km tout au plus. Elle peut affecter la totalité d'un bassin versant de dimension modeste (quelques dizaines de km²) mais sa durée de vie est limitée à quelques heures maximum. C'est la violence des pluies et la soudaineté de la

Tableau I : Nombre de victimes et ampleur des dégâts causés par les inondations (de 1850 à nos jours)
(Source : Carte universelle des risques naturels, Munich, 1988)

| | Victimes | Dégâts (en 10 ⁶ \$) |
|--|------------------|--------------------------------|
| Europe non méditerranéenne (All., Autr., Belg., France) | 0 | 1.900 |
| Europe méditerranéenne (Esp., Ital., Grèce, France..) | 1.608 | 4.083 |
| USA | 4.531 | 9.228 |
| Chine | 5.055.260 | 1.210 |
| Afrique du Nord | 3.542 | 80 |
| Afrique | 787 | 780 |
| Asie des Moussons (Inde, Bangladesh, ..) | 13.584 | 3.090 |
| Amérique du Sud | 9.401 | 1.624 |
| Australie | 5 | 317 |
| Total | 5.149.375 | 25.458 |

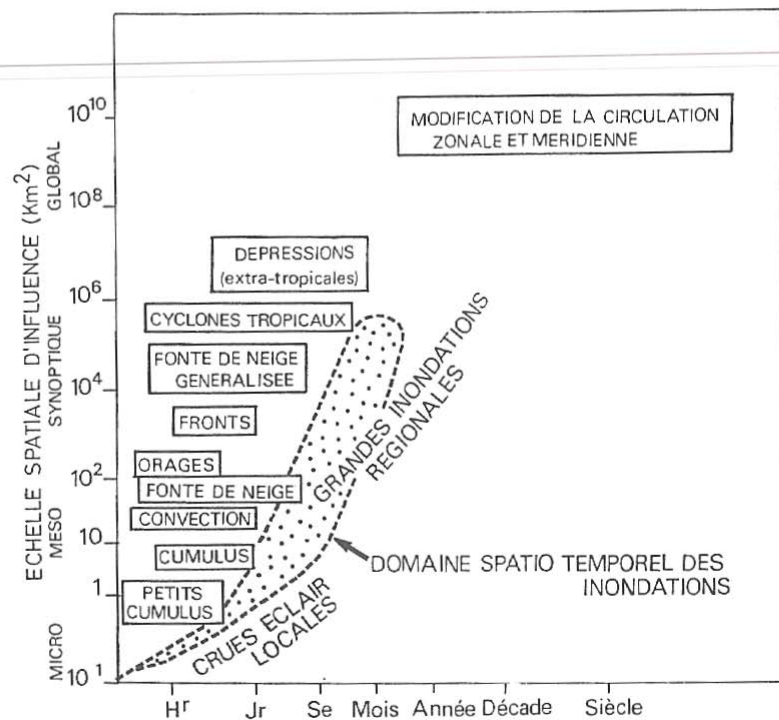


Figure 1 : Echelle spatio-temporelle des phénomènes climatologiques et hydrologiques générateurs d'inondations (d'après Hirschboeck, 1988)

crue qui prédominent dans ce cas mais des facteurs de sites tels que l'énergie du relief ou la disposition du réseau hydrographique, peuvent jouer un rôle aggravant. L'impact de telles crues reste relativement local et le nombre de victimes est généralement limité mais très variable en raison de la densité de l'habitat, de sa localisation et du type de constructions adopté. A l'opposé, le passage de vastes perturbations qui ont des diamètres d'action de plusieurs centaines de km, peut affecter des dizaines de milliers de km², comme par exemple l'ensemble du bassin du Mississippi. La durée de vie de tels événements est de plusieurs jours, voire semaines, d'autant plus que peuvent se présenter des phénomènes répétitifs et accumulatifs. Dans de tels organismes fluviaux, la transmission de la crue est lente et les inondations peuvent perdurer plusieurs semaines.

II. LA LUTTE CONTRE LES INONDATIONS DANS LES PLAINES CHINOISES

En ce qui concerne l'Asie, on s'attendrait a priori à voir plus de dégâts et de victimes dans les grands fleuves de l'Asie des Moussons. En effet, c'est là que sont enregistrés les records mondiaux de pluies de forte intensité et de longue durée susceptibles d'engendrer des crues spectaculaires. Mais, comme on l'a vu, l'essentiel des victimes résultent des deux fleuves chinois, le Yang Tsé Kiang qui est à la limite de l'Asie des Moussons et surtout le Hoang Ho (le Fleuve Jaune) qui lui, est en dehors de cette zone et qui, avec une pluviosité moyenne relativement faible (de l'ordre de 400 mm/an), ne présente pas des rapports de débits extrêmes inquiétants et, comme nous l'envisagerons plus en détail ci-dessous, la gravité de ses crues résulte de l'exhaussement de son lit dû à une sédimentation excessive.

L'importance des inondations en Chine ressort clairement du fait que 10 % du territoire chinois se situe sous le niveau d'inondations des principaux fleuves et que 65 % de la population chinoise vit sur ce territoire qui assure par ailleurs 70 % de la production agricole et industrielle (Dudgeon, 1995). Depuis l'antiquité les chinois ont appris à vivre avec ce fléau tout en essayant de s'en prémunir. Un catalogue des crues historiques de ces deux fleuves a d'ailleurs été constitué récemment, principalement en vue de réduire les erreurs dues à l'extrapolation des courbes de fréquence des débits extraordinaires qui doivent impérativement être pris en considération dans le calibrage des évacuateurs de crues des barrages et notamment de celui qui est prévu sur le Yangtse dans le site des Trois Gorges. De fait, la rupture d'un tel barrage mettrait en péril une population estimée à plus de 250 millions d'habitants.

Le Huang Ho (Fleuve Jaune) prend naissance dans les contreforts du Tibet, frôle une zone semi-aride où la pluviosité est inférieure à 250 mm/an et traverse deux fois l'immense plateau de loess développé au nord de la Chine (Fig. 2). Les dépôts de loess y dépassent plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur mais ils sont disséqués par un réseau de ravines très dense (6 km/km²), développées sur des fortes pentes, plus de 60 % de ce territoire se trouvant sur des pentes supérieures à 25° (Gong Shiyang, 1987). La combinaison de ces différents facteurs mais aussi le caractère saisonnier des pluies qui sont généralement de forte intensité, la relative pauvreté du couvert végétal liée à l'aridité du climat et une agriculture trop intensive, expliquent que le taux de dénudation moyen annuel est considérable, atteignant 6.000 t.km⁻² en moyenne. Janson (1983) cite des taux d'érosion qui peuvent atteindre localement 25.000 t.km⁻².an⁻¹, ceci sur base

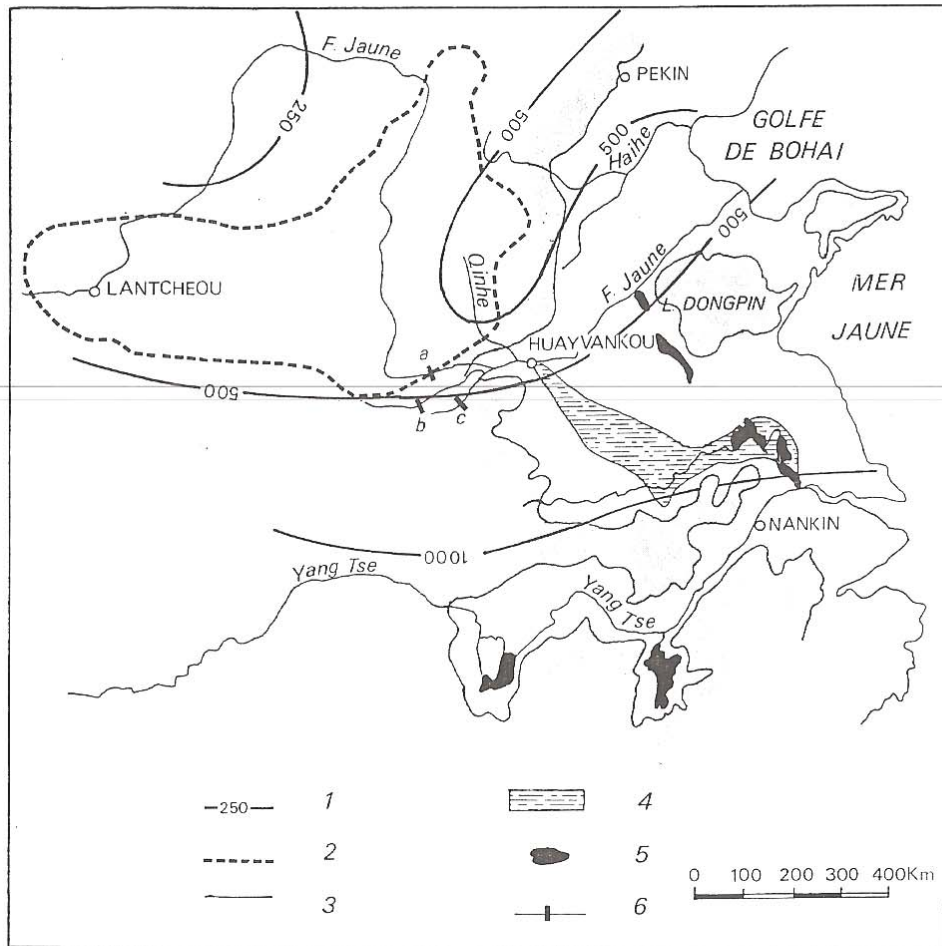


Figure 2 : Carte du bassin du Fleuve Jaune
 (d'après : Gong & Xu, 1987; Gongshiang, 1987; Janson, 1982; Li & Finlayson, 1993)
 (1) Allure générale des isohyètes (précipitations annuelles en mm); (2) limite approximative du plateau de loess; (3) limite des collines et montagnes; (4) zone inondée en 1938; (5) lacs; (6) principaux barrages : (a) barrage de Sanmen sur le Fleuve Jaune; (b) barrage sur le Louhé; (c) barrage sur le Yihé.

de mesures effectuées dans des ravines et des tributaires de 1^{er}, 2^e et 3^e ordre, dont on estime que le taux de rétrocession des sédiments aux rivières principales atteindrait près de 100 %. Il en résulte que la charge annuelle transportée par le fleuve atteint des valeurs considérables. Des mesures réalisées à Sanmen dans les gorges situées avant le débouché dans la plaine chinoise, donnent un débit solide de $1,63 \cdot 10^9 \text{ t.an}^{-1}$ avec des concentrations extraordinaires qui dépassent 300 kg.m^{-3} et atteignent même 900 kg.m^{-3} , ce qui représente 5 fois la charge transportée par le Mississippi (Li & Finlayson, 1993). Un quart de ces sédiments se dépose dans le tronçon aval, long de 800 km, où le fleuve coule dans une plaine très large sans le moindre relief, où vivent près de 120 millions d'habitants. Pour maintenir le fleuve dans son lit, des levées ont été édifiées déjà avant le début de notre ère, mais de façon systématique depuis le milieu du XIX^e siècle. On assiste ainsi à un exhaussement progressif du lit que l'on tente évidemment de contrecarrer par le rehaussement des digues, de telle sorte que finalement le fleuve se trouve perché à une dizaine de mètres au-dessus sa plaine alluviale (Fig. 3).

Il arrive fréquemment que le fleuve rompe ses digues, ceci en moyenne une fois tous les deux ans, générant une inondation dans la plaine située en contrebas. Cette situation ne présente heureusement pas toujours un caractère catastrophique. Toutefois, lors des plus grandes crues (mais aussi en fonction de l'état des digues) une fraction importante du débit peut s'engouffrer dans ces brèches (la plus importante connue a atteint 2,5 km de longueur) et il peut alors se créer un nouveau tracé dans le champ d'inondation (plus de 25.000 km^2 ont été recouverts en 1887) et des dépôts considérables de limon peuvent s'accumuler jusqu'à 50 km du cours

du fleuve. Cette masse d'eau cherche un exutoire et il peut ainsi se créer de nouveaux bras du fleuve, voire même comme en 1887, un nouveau cours avec une nouvelle embouchure. Des informations provenant de nombreuses cartes historiques, de chroniques anciennes et d'observations géomorphologiques ont permis d'identifier les tracés anciens du fleuve et d'établir qu'en 2500 ans, le fleuve avait subi 26 changements majeurs de son cours (Fig 4). Le changement de cours le plus dramatique résulte à l'origine d'une action anthropique; afin de contrecarrer l'avancée des troupes japonaise en 1938, les autorités chinoises décidèrent d'ouvrir une brèche dans les digues du fleuve afin d'inonder le territoire. Les conséquences de cette inondation furent catastrophiques puisque le fleuve changea à nouveau de cours, inondant près de 45.000 km^2 et faisant près de 900.000 victimes (Li & Finlayson, 1993).

Dans l'immédiat après guerre un vaste programme a été mis sur pied pour lutter contre les inondations. Il était axé à l'origine sur la reconstruction et l'édification de plus de 1500 km de nouvelles levées. Mais les inondations de 1958 ont montré que lutter contre les inondations uniquement sur base de l'édification de levées n'était pas suffisant. Le débit de cette crue ($22.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) a d'ailleurs servi de valeur de référence pour la reconstruction des digues, mais il s'avère que sa récurrence (60 ans seulement) est sensiblement trop faible (le débit de la crue centennale est estimé à $29.300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, celui de la millénaire à $42.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Par ailleurs, même des crues beaucoup plus faibles que celle de 1958, ne peuvent plus à l'heure actuelle être contrôlées facilement. En 1976 par exemple, lors d'une crue de moins de $10.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, le niveau a dépassé de 0,5 à 1 m celui atteint en 1958, ce qui a provoqué l'inondation de plus de 1400 km^2 de terres

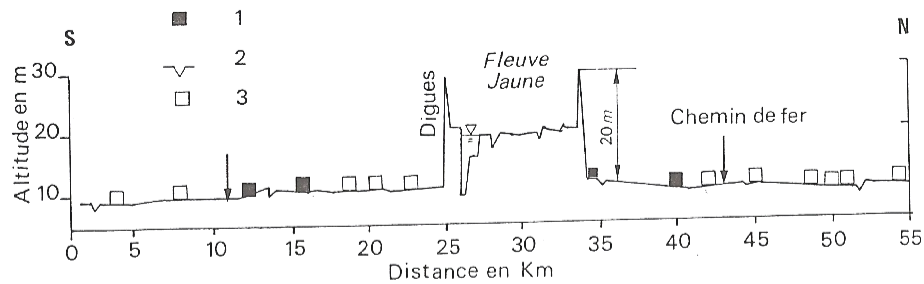


Figure 3 : Le cours perché du Fleuve Jaune dans la plaine chinoise (modifié d'après Li & Finlayson, 1993)
(1) Route principale; (2) Rivière; (3) Villages.

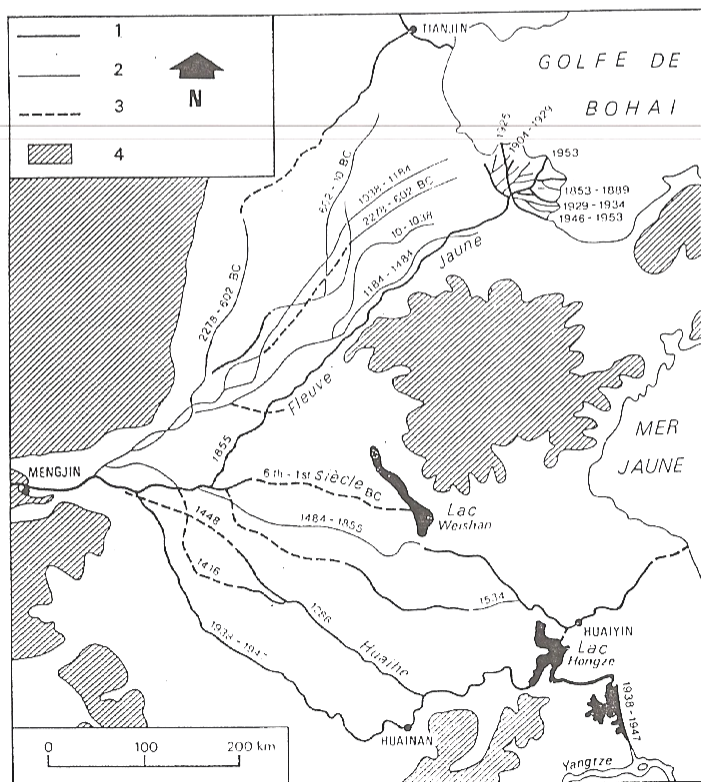


Figure 4 : Les principaux changements de cours du Fleuve Jaune lors de la période historique (d'après Li & Finlayson, 1993)
(1) Cours proche du cours actuel de rivières; (2) Traces du cours ancien d'après des dépôts sableux et des dunes; (3) Traces du cours provenant de sources historiques; (4) limite de la plaine

et la mort d'une cinquantaine de personnes. Ceci résulte, comme nous l'avons dit plus haut, du continu exhaussement du fond du lit entre les levées lié à l'apport excessif de sédiments, exhaussement qui, comme cela apparaît clairement à la figure 5, a dépassé 4 m en cinquante ans (Li & Finlayson, 1993).

Tout un programme de constructions de barrages a été entrepris afin de contenir les crues mais aussi de réduire les apports de sédiments dans le cours inférieur du fleuve et d'y limiter l'exhaussement du lit. Ainsi entre 1947 et 1984, 1500 réservoirs de dimension intermédiaire (capacité individuelle inférieure à 1.10^6 m^3) représentant une capacité totale de stockage de 500.10^6 m^3 ont été édifiés ainsi que 700 grands barrages dont la capacité totale atteint 8 billions de m^3 (Gong Shiyang, 1987). Le plus important de ces barrages, édifié à Sanmen dans les gorges du Fleuve Jaune (cf. Fig. 2), a une capacité de 36 milliards de m^3 . Mais il s'est avéré que 18 ans après sa mise en service, près de 40 % du lac de retenue était déjà colmaté par des sédiments, provoquant une élévation du lit en amont du barrage atteignant 4 m (Li & Finlayson, 1993). Par ailleurs ceci réduit sensiblement la capacité de stockage des crues si bien que la gestion de la retenue a du être modifiée afin d'effectuer des chasses qui permettent une vidange du lac.

Indépendamment de ce problème de colmatage, le barrage de Sanmen n'aurait cependant pas pu résoudre tous les problèmes puisque les inondations du Fleuve Jaune résultent en partie de l'effet de ses affluents qui se trouvent plus en aval. Ce fut le cas lors de la crue de juillet 1958 (la plus importante enregistrée sur le Fleuve Jaune depuis 1919) quand des pluies d'une intensité extraordinaire (650 mm en 24 h) provoquèrent une crue des affluents (Yihe, Luohe et Qinhe, cf. Fig. 2). Une étude

récente réalisée sur la genèse des inondations catastrophiques du Fleuve Jaune, a montré que plusieurs d'entre elles, comme celles de 1761 de 1963 et de 1975, résultaient également de violentes précipitations dans le bassin en aval de Sanmen et dans les affluents (Li & Finlayson, 1993). Deux barrages ont ainsi été édifiés, l'un sur le Yihe et l'autre sur le Luohe avec des capacités de stockage respectives de 1.10^9 m^3 et $0,7.10^9 \text{ m}^3$. Par ailleurs, malgré la problématique de colmatage des retenues mise en évidence dans le barrage de Sanmen, la construction d'un autre barrage a été entreprise sur le Fleuve Jaune lui même.

En plus de la construction de grands barrages, deux bassins de rétention ont été aménagés en marge du fleuve, dans son cours inférieur. Il s'agit du Lac Dongping qui initialement se présentait comme une vaste dépression où le Dawen rejoignait jadis le Daqing ce dernier étant à l'heure actuelle occupé par le Fleuve Jaune depuis le changement de cours en 1855 (Fig. 4). En période de crue, les eaux du fleuve se déversent dans le lac qui atteint alors une superficie totale de 627 km^2 , ce qui a nécessité la construction d'une digue longue de 137 km. Dans ce bassin de rétention vivent 250.000 habitants et il se pose bien évidemment un problème d'évacuation lorsque il est prévu d'y dériver la crue. La capacité de stockage est de $3,02. 10^9 \text{ m}^3$ mais une partie sert aussi à stocker les eaux du Dawen. Un autre type de bassin de rétention a été élaboré grâce à l'aménagement d'une aire de stockage entre les digues le long du fleuve (Fig. 6). La superficie totale est de 2136 km^2 (incluant 160.000 ha de terres cultivées) où vivent 1,5 millions de personnes. Le rôle de ce bassin est d'assurer un stockage de la crue lorsque le débit dépasse $22.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la station de Huayankou (débit guide ayant servi pour le calibrage des digues).

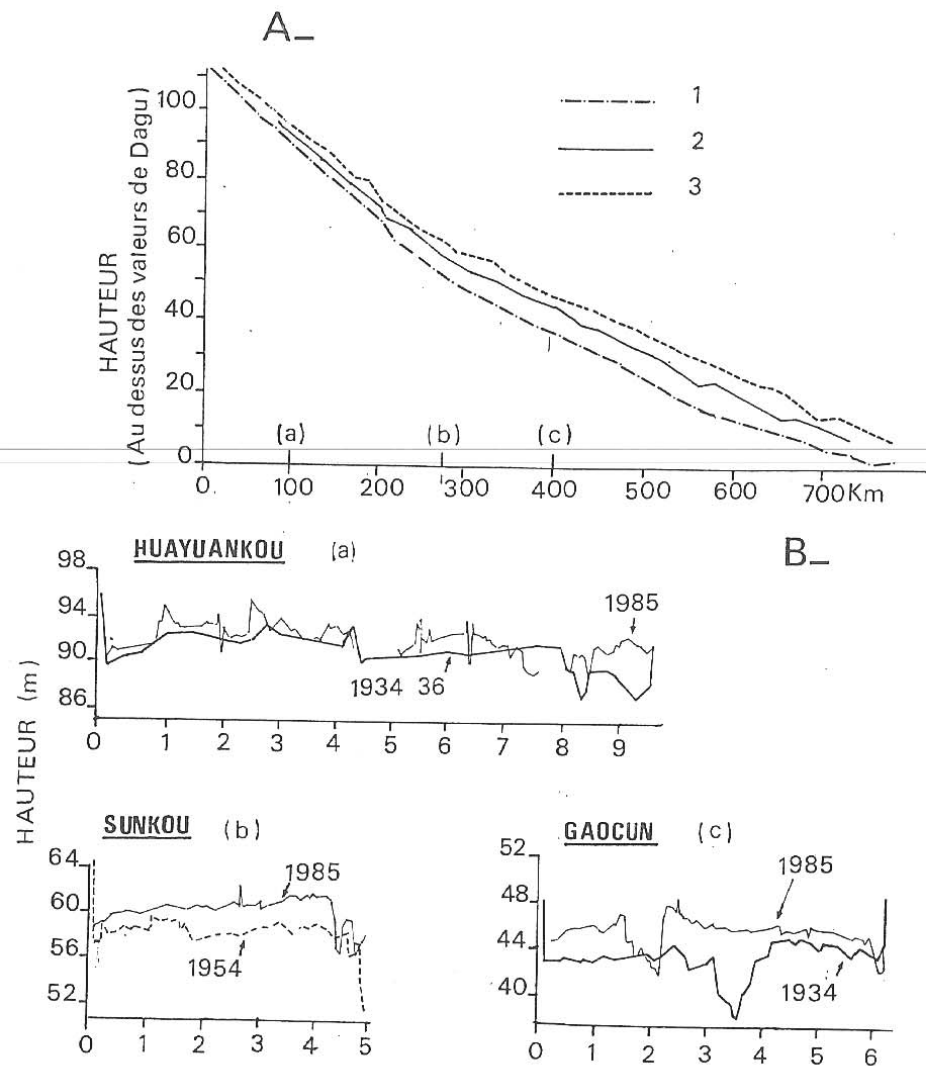


Figure 5 : L'exhaussement du lit du Fleuve Jaune (d'après Li & Finlayson, 1993)
 A. Profil longitudinal entre Tiexie et Lijn : (1) Fond du lit en 1855; (2) Fond du lit en 1954; (3) Fond du lit en 1982
 B. Coupes transversales

Toutefois, étant donné le coût économique considérable qu'engendrerait l'utilisation de ce bassin de rétention, il n'a encore jamais servi jusqu'à présent (Li & Finlayson, 1993).

En dépit du surhaussement des digues et de l'accroissement des capacités de rétention dans les barrages, le constat reste cependant alarmant comme le soulignent Li et Finlayson en conclusion de leur étude. En effet, les digues ne résisteraient probablement pas à une crue de 22.000 m³.s⁻¹ puisque, comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, des dégâts importants ont déjà enregistrés pour des crues nettement inférieures. Par ailleurs, il semble que le risque d'inondation lié aux crues des affluents inférieurs, ait été trop largement sous-estimé. Les averses qui ont provoqué les crues désastreuses mises en évidence ci-dessus, apparaissent certes d'une violence extraordinaire mais elles n'ont cependant pas une récurrence exceptionnelle (60 ans environ). Enfin un énorme problème réside dans le dispositif d'alerte, le laps de temps pour prévenir et évacuer la population serait en effet réduit à 10 - 12 heures seulement.

Sachant que le plateau loessique reste la source principale des sédiments - d'après Gong Shiyang (1987) trois quarts des sédiments transportés par le Fleuve Jaune provient d'une surface de 100.000 km² - un programme de lutte anti érosive portant sur le plateau de loess a été mis en oeuvre. Il implique la généralisation de la culture en terrasses sur un territoire de 20.000 km², la construction de réservoirs pour améliorer l'irrigation, des plantations d'arbres et la végétalisation des sols afin de stabiliser ces derniers et, depuis le début des années septante, la construction de plusieurs milliers de petites retenues dans les ravines ce qui permet de recréer de nouvelles zones de cultures. Ces différentes mesures ont porté leur fruit puisque la comparaison des

quantités de sédiments transportés par le Fleuve Jaune au cours de la période 1970-1984 et 1950-1969, montre une réduction de près de 35 % dont 18 à 20 % résulte d'une diminution des précipitations et 16 à 19 % des travaux d'amélioration dans les affluents et de la politique de conservation des sols (Gong Shiyang, 1987). Des recherches effectuées dans le Wuding dont le bassin est situé en plein milieu de la zone loessique avec des taux de dénudation annuel atteignant 10.000 t.km⁻².an⁻¹, révèlent que en une vingtaine d'années, les apports de cette rivière au Fleuve Jaune ont diminué de plus de 60 % ; un peu moins de 10 % de cette réduction résulte de la rétention des sédiments dans les grands réservoirs mais près de 50 % du piégeage des sédiments dans les petites retenues, tandis que 5 % seulement de cette réduction serait liée au développement des cultures en terrasses et aux plantations d'arbres et végétaux. Ce rôle des petites retenues ressort bien de la comparaison effectuée par Gong Shiyang (1987), entre un bassin où l'édification de petites retenues a été généralisée (avec 3000 retenues pour un bassin de 600 km²) et un autre bassin où au contraire ce sont les mesures de protection par culture en terrasse et par revégétalisation qui ont été adoptées; la réduction de la charge en sédiments s'est élevée à plus de 60 % dans le premier bassin contre 15 % seulement dans le second.

La construction de vastes réservoirs sur les fleuves alimentant la plaine chinoise afin d'y réduire les pics de crues, l'utilisation d'une partie de cette eau pour l'irrigation et les pertes par évaporation dans les retenues ont fait que le volume écoulé s'est considérablement réduit. L'impact de cette diminution a été plus spécialement cerné dans le bassin du fleuve Haihe, le plus septentrional des fleuves de la plaine chinoise où les précipitations

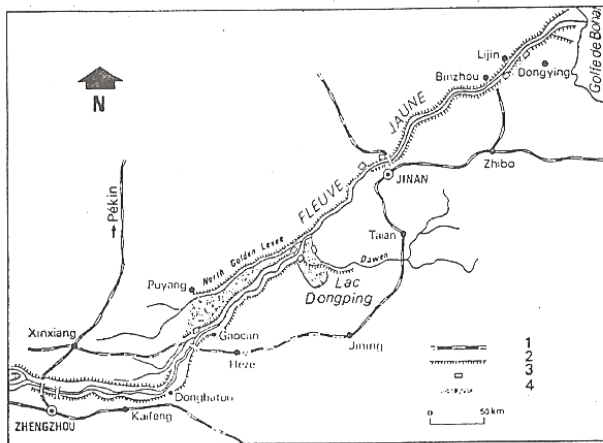


Figure 6 : Le système de digues de protection et de bassins de rétention latéraux du Fleuve Jaune (d'après Li & Finlayson, 1993); (1) Voie de chemin de fer; (2) Dignes; (3) Ecluses; (4) Zones de rétention.

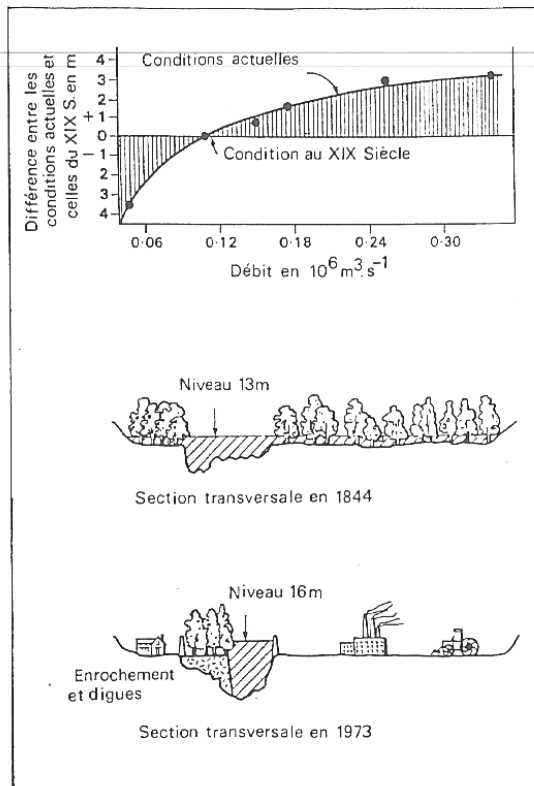


Figure 7 : Modifications du niveau des crues du Mississippi en relation avec l'endiguement du fleuve et l'occupation de la plaine alluviale (d'après Hooke, 1986)

annuelles représentent moins de 500 mm, expliquant d'ailleurs le recours à l'irrigation (localisation sur la Fig. 2). La construction de 134 barrages entre 1949 et 1982 a provoqué une altération sensible du régime d'écoulement du fleuve dans la plaine mais elle s'est effectuée en deux étapes bien distinctes (Gong & Xu, 1987). Le but initial était d'amortir les crues estivales et de provoquer des lâchages hivernaux; de la sorte, le régime était beaucoup plus uniforme. Mais à partir des années septante, le régime a été beaucoup plus altéré dans la mesure où l'eau a été utilisée pour l'irrigation et pour satisfaire les besoins croissants de l'industrie, si bien que le débit est pratiquement nul la plupart des mois de l'année. L'écoulement à la mer a été réduit de 52 % et le transport des sédiments de 80 %, ce qui a provoqué une réduction de la sédimentation dans la plaine alluviale de 1,4 à 0,5 mm/an. Dans un premier temps, lorsque le régime saisonnier du fleuve était modulé grâce aux barrages, on a également observé une réduction de la sédimentation dans le lit même du fleuve avec comme résultat un approfondissement et un rétrécissement des chenaux. Mais, lorsque à partir des années septante, il n'y a plus eu de lâchés hivernaux systématiques, les rivières sont devenues de type intermittent, avec un retour à l'exhaussement de leur lit. Gong et Xu (1987) y voient plusieurs raisons. Tout d'abord, lorsque les retenues sont pleines et que des lâchés de crue doivent être effectués, les concentrations en sédiments atteignent des valeurs nettement supérieures à celles qui auraient prévalu pour ces mêmes débits en régime non influencé, ce qui entraîne des accumulations très importantes en aval. De plus, lorsque la crue progresse vers l'aval, la concentration en sédiment augmente du fait que l'eau s'infiltré dans le lit. Par ailleurs, lorsque les rivières sont à sec, le vent peut alors refaçonner le profil transversal du lit, avec une érosion des *points bars* et un

remplissage des mouilles les plus profondes. Lors des crues estivales ultérieures, ces dépôts sont remaniés de façon à réajuster la section primitive, ce qui entraîne une disponibilité plus grande en matériel par rapport à un système qui n'aurait pas été perturbé par l'action éolienne. Enfin un apport substantiel de matériel résulte de l'érosion des berges. Dans les régions où on pratique l'irrigation, elles sont en effet fragilisées du fait de l'élévation du niveau de la nappe aquifère et de l'accroissement des gradients des eaux souterraines qui en résultent. L'érosion des berges résulte également de l'action des vagues créées par les vents violents soufflant sur les vastes plans d'eau individualisés par les barrages érigés sur les rivières. Les sédiments produits par l'attaque des berges suivant ces processus représenteraient 40 % du total des sédiments déposés dans les rivières.

Le Yang Tsé Yang a un régime plus contrasté que le Fleuve Jaune. La pluviosité annuelle sur l'ensemble de son bassin oscille entre 1000 et 1200 mm mais avec une très nette différenciation puisque le bassin supérieur reçoit moins de 500 mm au Tibet tandis que les pluies dépassent 2 m sur les versants orientaux dans le bassin Rouge. Avec un module annuel de 32.000 m³.s⁻¹, ce fleuve est le troisième au monde par l'importance du volume écoulé. Ses crues sont spectaculaires, spécialement dans les gorges ("The Three Gorges") qu'il traverse juste avant de déboucher dans la plaine chinoise. Vu le rétrécissement du fleuve - par endroit sa largeur est réduite à moins de 300 m - et l'importance des débits de crue (supérieur à 100.000 m³.s⁻¹ en juillet 1870), le niveau du fleuve peut monter à plus de 80 m par rapport au niveau d'étiage (Baker & Kochel, 1988). De telles élévations du plan d'eau sont susceptibles de créer des dépôts de crues (*slag water deposits*) dans le cours même des tributaires

du fleuve, à plusieurs kilomètres en amont de leur confluence. En fonction des conditions de pente (la dénivellée du fleuve dans ses gorges est de 100 m sur moins de 200 km) et de l'importance des vitesses en période de crues (de l'ordre de 9 m.s^{-1}), les valeurs des forces tractrices et des puissances spécifiques (qui sont toutes deux un descripteur de la compétence d'une rivière) sont d'un ordre de magnitude deux à trois fois supérieurs à celles des rivières dites "à lits mobiles" (Baker, 1988).

Dans la partie inférieure de son cours, le fleuve est jalonné d'un chapelet de lacs, dont les deux plus importants (le lac Dongting et le lac Poyang) ont des superficies respectives de 2740 et 3960 km^2 (cf. Fig. 2). Ces lacs jouent un rôle de régulateur des crues: ils se remplissent au printemps par alimentation des fontes de neige et en été à la suite des pluies de la mousson et se vidangent en période automnale et hivernale.

Indépendamment de l'aspect spectaculaire que présentent les crues du fleuve dans ses gorges et malgré le rôle régulateur joué par les bassins de rétention naturel que sont les lacs, les inondations du Yang Tsé dans la plaine chinoise atteignent une ampleur aussi catastrophique que celui du Fleuve Jaune. Ainsi, l'inondation de 1931 a recouvert plus de 100.000 km^2 et causé la mort d'un million de personnes (Dudgeon, 1995). D'autres inondations plus récentes ont encore alourdi ce bilan: 30.000 victimes en 1954, un millier en 1980 (55.000 km^2 inondés), 2500 victimes en 1991 sans compter 18,4 millions de personnes sérieusement affectées par cette inondation.

Les crues ont lieu en été à la suite d'averses successives qui déclenchent plusieurs ondes dont la combinaison aux confluents peut engendrer des montées catastrophiques (comme ce fut le cas en 1931 et 1954), ou encore à la suite d'une

seule série d'averses (1350 mm en 6 jours, d'après Loup, 1974). Des facteurs liés aux conditions du lit aggravent l'effet de pluies de telle intensité: tout d'abord le fleuve déborde peu dans la partie supérieure et médiane de son cours, empêchant tout écrêtement des crues vers l'aval. De plus les pentes sont fortes et le réseau hydrographique dessine une concentration en éventail.

La quantité de sédiments transportées par le Yang Tsé est certes moins importante que celle du Fleuve Jaune mais elle reste néanmoins appréciable. Li & Finlayson (1993) estiment cette quantité à $0,478 \cdot 10^9 \text{ t.an}^{-1}$, avec des concentrations moyennes de $0,54 \text{ kg.m}^{-3}$. Toutefois, à la différence du Fleuve Jaune, la charge a augmenté au cours des dernières décennies, ceci en conséquence de la déforestation de la partie supérieure du bassin. En effet, en trente ans, on estime que seulement 3 % du couvert forestier a subsisté, provoquant des érosions spectaculaires sur des superficies qui, à l'heure actuelle, couvrent de 30 à 40 % de l'ensemble du bassin du Yang Tsé, alors qu'elles représentaient à peine 20 % dans les années septante (Dudgeon, 1995). Cet apport supplémentaire de sédiments à l'aval a provoqué, outre un exhaussement du lit, le comblement des lacs Dongting et Poyang, spécialement de ce dernier où le fond du lac s'élève de $2,5 \text{ cm.an}^{-1}$, réduisant sa superficie de 4350 km^2 en 1949 à 2740 km^2 en 1987 (Dudgeon, 1995). Toujours selon cet auteur, on estime que la sédimentation dans l'ensemble des lacs de la plaine alluviale du Yang Tsé a provoqué une réduction de leur capacité de stockage de $35 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Cet afflux de sédiments lié à une érosion plus active due à la déforestation, expliquerait l'aggravation des crues du Yang Tsé au cours de ces quinze dernières années.

Un vaste programme de reboisement

a été mis sur pied avec le but d'atteindre 700.000 km^2 de plantations en l'an 2000 pour l'ensemble de la Chine. Ceci s'est accompagné de modifications dans les pratiques de culture. Ainsi le sommet des collines est reboisé pour réduire le ruissellement et l'érosion, les versants à forte pente sont destinés aux plantations, les zones où les pentes sont plus faibles sont réservées aux vergers et à une agriculture mixte. Les zones humides et les plaines alluviales ont été drainées et converties pour la production de céréales, l'élevage et les pêcheries. Le programme de reforestation jouera certes un rôle en tant que moyen de lutte contre l'érosion et donc pour limiter la production de sédiment, mais, comme le souligne d'ailleurs Dudgeon (1995), l'impact direct sur la régulation des inondations risque de rester finalement assez limité. En effet la couverture végétale est moins dense et présente globalement une moindre infiltrabilité que la forêt naturelle et on risque fort d'arriver à une saturation complète du système, sachant, comme le rappelle Dudgeon (1995), que dans l'Himalaya oriental, les pluies peuvent totaliser 5000 mm au cours des six mois que dure la mousson.

Un autre moyen de lutte contre les inondations reste l'édification de barrages. Le site des trois gorges a ainsi été retenu pour l'installation d'un gigantesque barrage, principalement pour la production d'électricité (étant donné le débit et la dénivellation mentionnée ci-dessus) mais aussi comme réservoir de rétention des crues et comme réserve pour l'irrigation, ceci impliquant des transferts d'eau vers le nord du pays grâce à un gigantesque canal. Ce barrage, haut de 185 m aurait une capacité de rétention de $40 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ et serait le plus grand du monde en terme d'hydroélectricité. Différentes études synthétisées par Dudgeon (1995) ont été réalisées en vue de cerner l'impact de ce

barrage, d'un point de vue économique et écologique. Indépendamment de l'aspect lié à la production d'électricité qui réduira de façon substantielle la consommation de charbon et donc la pollution qu'elle génère, différents impacts sont repris brièvement ci-dessous. Ceci concerne tout d'abord l'altération du régime de remplissage des lacs situés dans le cours inférieur qui sont des zones d'un intérêt considérable pour les oiseaux migrateurs. Par ailleurs, à la suite de la présence du barrage, le niveau du fleuve serait 1 à 2 m plus élevé durant la saison sèche, ce qui risque également d'avoir des effets négatifs sur la faune et la flore aquatique dans la mesure où la réduction des amplitudes saisonnières du niveau du fleuve entraînerait une régression des zones de végétation aquatique, ce qui affecterait sérieusement le développement des populations de poissons. Enfin, des observations effectuées dans le Zhuijiang (autre rivière du sud de la Chine où une politique de régulation des débits a été entreprise dès le début des années soixante grâce à la réalisation de plus d'un millier de barrages), montrent une chute sensible de la production piscicole mais aussi de l'abondance des espèces, du fait du blocage de la migration des poissons lié à la présence des barrages mais aussi du fait de modifications du régime thermique des eaux liées au stockage dans les retenues.

III. LA LUTTE CONTRE LES INONDATIONS DU MISSISSIPPI

L'importance des moyens de lutte adoptés par les Chinois sont comparables à celle des mesures prises sur le Mississippi à partir de 1927. L'endiguement du fleuve avait certes déjà débuté dès la moitié du XIXe siècle, mais de façon quelque peu anarchique puisque chaque communauté locale élevait ses propres digues sans aucune standardisation quant aux matériaux

utilisés, quant aux dimensions et aux hauteurs si bien que les débits que ces digues pouvaient contenir étaient très variables. Face aux crues les plus importantes, ces constructions n'assuraient pas une protection efficace, comme cela a été démontré lors des inondations de 1927 qui ont recouvert près de 70.000 km², laissant 650.000 personnes sans abri. Les autorités américaines entreprirent la reconstruction des digues mais en imposant des normes standard quant à leur niveau, à leur profilage et au type de matériel utilisé.

Dans le cas du Mississippi se pose cependant le problème de la navigation qui n'est pas toujours compatible avec les mesures prises pour lutter contre les inondations. Pour améliorer les conditions de navigation, la largeur et la section du chenal ont été réduites, de telle sorte que le niveau moyen des crues pour un débit de fréquence donnée est maintenant plus élevé. Ceci est encore amplifié par le fait que, étant donné l'endiguement du fleuve, la plaine d'inondation n'est plus fonctionnelle et ne permet donc plus le stockage d'une masse d'eau (Fig. 7). Les emprises sur le lit du fleuve et sur ses zones de débordement ont été tellement importantes au cours de la période 1888-1968, qu'à Saint Louis par exemple, la hauteur d'eau atteinte initialement par une crue de 200 ans, correspondrait actuellement à une crue trentennale (Morisawa, 1985).

La mesure la plus spectaculaire en vue d'améliorer la navigation mais aussi de faciliter l'évacuation des débits et d'accélérer la transmission des crues, fut probablement la rectification du cours du Mississippi entreprise au cours des années trente. Le recoupement artificiel de seize méandres en 10 ans a provoqué une réduction de la longueur du cours du fleuve de 244 km (Morisawa, 1985). L'accroissement des pentes consécutif à ces

rectifications, a provoqué une incision du lit et une érosion des berges là où des mesures de protection n'avaient pas été prises, causant un élargissement du fleuve. Une quantité de matériel appréciable a ainsi été mise à la disposition de la rivière augmentant l'importance de la charge de fond, occasionnant à l'aval l'exhaussement local du lit et même l'apparition locale du tressage (Morisawa, 1985). Par ailleurs, Hooke (1986) rapporte que les secteurs rectifiés nécessitent des dragages plus importants et des ouvrages de protections de berges et des épis plus nombreux que dans les secteurs où la méandration est la plus développée parce que dans ces derniers, le stockage et le transit des sédiments peuvent s'y organiser d'une façon plus adéquate. Winkley (1982) a d'ailleurs montré qu'en dépit des dragages répétés, des protections de berge généralisées et de l'édification de nombreux épis, le fleuve tend à reconstituer un nombre identique de séquences de seuils, de mouilles et de dépôts de convexité (Fig. 8). Par ailleurs, comme le note cet auteur, il n'est pas exclu que l'accroissement de la rugosité résultant de cette géométrie du lit et des structures nécessaires à la maintenir, puisse avoir un impact sur la ligne de crue. En conclusion de son analyse, Winkley estime d'ailleurs que le tracé qui nécessiterait une maintenance minimum, tout en assurant une profondeur adéquate pour la navigation et les meilleures possibilités d'évacuation des crues, serait un chenal dont l'indice de sinuosité (défini comme étant le rapport entre la longueur effective du chenal et la longueur de la vallée prise à vol d'oiseau) avoisinerait 1,4.

Le problème des levées et de l'endiguement a suscité bien des polémiques et a été à la base d'une orientation vers d'autres moyens de luttés contre les inondations. Des bassins de rétention latéraux furent créés, le plus grand d'entre

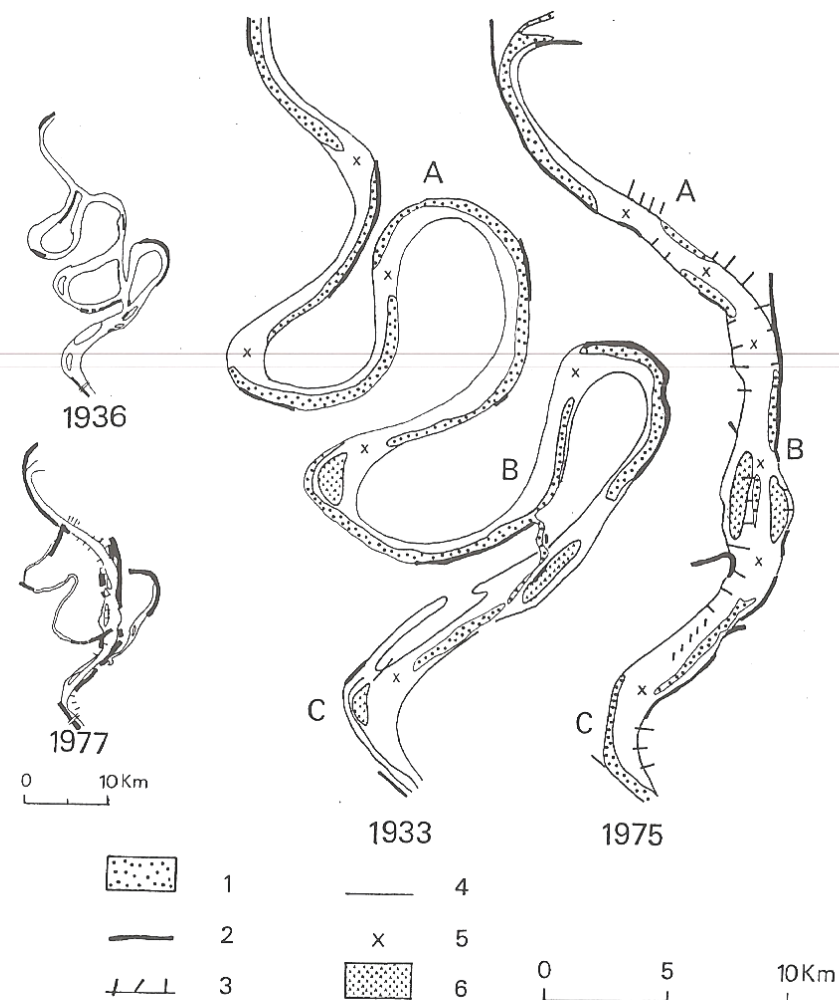


Figure 8 : Evolution d'un secteur du Mississippi à la suite de sa rectification artificielle (d'après Winkley, 1982)
 (1) Mouille; (2) Protection de berge; (3) Digues en épis; (4) Limite du lit; (5) Haut fond; (6) Bancs médians

eux s'étendant sur plus de 500 km². Dans la partie aval de son cours, un canal de dérivation fut aménagé, canal qui s'est par la suite avéré capable d'évacuer 7500 m³.s⁻¹. Enfin une série de barrages ont été créés sur les affluents (Tennessee et Ohio) et, même si leur rôle initial était principalement la production d'énergie électrique (cf. Tennessee Valley Authority), ils se sont néanmoins révélés capables de contenir et d'écrêter les crues de ces affluents. Ce rôle des barrages a été clairement mis en évidence lors des inondations de 1993, qui ont vu le débit de la crue centennale être dépassé à 46 stations du bassin du Mississippi Supérieur (Parett *et al.*, 1993). Les barrages édifiés sur les affluents du Missouri (et principalement sur le Kansas où 85 % du bassin est contrôlé par des barrages), ont permis de stocker 16 milliards de m³ au cours du seul mois de juillet 1993, réduisant le débit moyen journalier du Missouri de 6000 m³.s⁻¹ à sa confluence avec le Mississippi (Perry, 1994).

Le bilan de toutes les mesures adoptées sur l'ensemble du bassin du Mississippi a été globalement positif puisqu'on estime qu'elles ont permis d'abaisser localement le niveau des inondations de près de 2 m. Ainsi lors de la crue de 1973, elles ont évité que 58.000 km² ne soient inondés, économisant de ce fait près de 15 milliards de \$ (Clark, 1988). Toujours selon cet auteur, le montant des travaux de protection effectué sur l'Ohio s'est élevé à 2,3 milliards \$ mais les économies ainsi réalisées ont été estimées à 6,6 milliards \$. Pour l'ensemble des USA (mais où on sait que le bassin du Mississippi intervient pour une grande majorité), Ward (1978) estime que les bénéfices résultant de la lutte contre les inondations au cours de la période 1936-1967, dépassent les coûts que cette lutte a

engendré, selon un rapport proche de 2. Il convient cependant de nuancer ce bilan car, comme il ressort de la figure 9, les dégâts occasionnés par les inondations ne cessent de croître (10 billions \$ lors des inondations de 1993) et comme le rappelle Smith (1993), 10 % de la population des USA vivent dans des sites susceptibles d'être atteints par une crue centennale. Fort heureusement les pertes en vies humaines tendent à se stabiliser, du fait des mesures de protection mais aussi du fait de la prédiction des crues et de l'efficacité de l'évacuation des populations, mesures qui malheureusement ne peuvent être d'application dans les *flash flood* que nous envisageons ci-dessous.

IV. LES FLASH FLOOD (CRUES DE DÉBOREMENT TORRENTIEL) : LE CAS DES RIVIÈRES MÉDITERRANÉENNES

D'après un rapport de l'UNESCO, les *flash flood* (dite " crue de débordement torrentiel") font de 2 à 3 fois plus de victimes que les inondations des grands fleuves. Le catalogue des crues de projet, c'est à dire les crues maximum maximorum qui sont prises comme référence notamment dans le calibrage des évacuateurs de crues des barrages, est basé sur le recensement systématique des crues éclair qui se sont produites dans le monde. Dans ce catalogue, la région méditerranéenne apparaît comme une zone particulièrement sensible à ce type d'événements. En effet, ces régions sont soumises à des pluies de courte durée mais d'intensité extrêmement élevée. Un rapport récent du Ministère de l'Environnement (IPGR, 1994) a réalisé un inventaire des hauteurs et des durées de pluies observées dans le sud de la France; nous y épinglerons les valeurs suivantes : 100 mm en 1 heure, 200 à

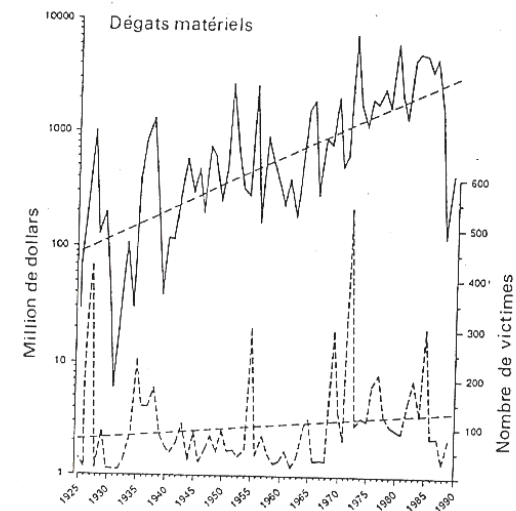


Figure 9 : Nombre annuel de décès et montant des dégâts provoqués par des inondations aux USA (d'après Smith, 1993). Les dégâts sont exprimés en millions de dollars ajustés aux valeurs de 1990.

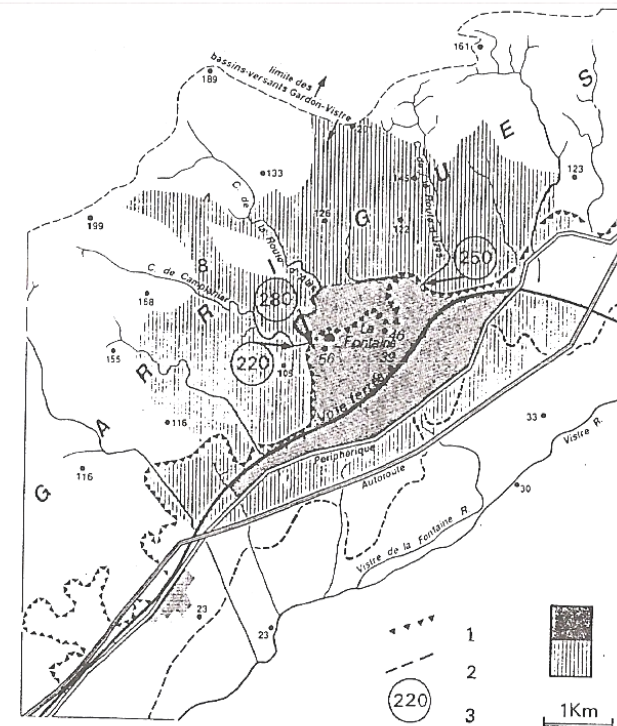


Figure 10. Les inondations à Nîmes : situation des bassins et débits atteints (d'après Fabre, 1989)
 (1) Limite du glacier de piedmont; (2) limite de la plaine; (3) débits de pointe atteints lors de la crue du 3 octobre 1988; (4) zone d'urbanisation dense; (5) zone d'urbanisation diffuse.

300 mm en 4 heures, plus de 400 mm en 24 heures.

Toujours selon ce rapport, de telles valeurs apparaissent au moins 1 fois tous les 3 ou 4 ans en moyenne en Languedoc-Roussillon. Dans certaines stations des Cévennes, des intensités de 70 à 90 mm.h⁻¹ en 30 minutes ne sont pas considérées comme exceptionnelles (Cosandey, 1994), alors que dans nos régions, de tels événements ont une récurrence centennale (Laurant, 1974).

La répartition dans le sud de la France des précipitations supérieures à 200 mm en 24 heures a été analysée par Staron (1993) au cours de la période 1915-1992; elles forment une bande qui s'étire des Pyrénées orientales jusqu'au pied des Préalpes du Vercors avec un maximum sur les Cévennes. Il existe quelques autres diverticules de moindre importance, au niveau de Montélimar et d'Orange (sur l'axe duquel on retrouve Nîmes et Vaison), ainsi qu'un pôle secondaire entre le Var et les Alpes maritimes. En comparant la répartition des pluies avec celles des catastrophes connues, Staron (1993) note qu'il se dessine un axe à risque, parallèle à la zone touchée habituellement par les fortes pluies cévenoles. Toutefois, comme conclut cet auteur, ce ne sont pas nécessairement les pluies les plus importantes qui produisent les dégâts les plus forts mais bien celles qui se trouvent à la périphérie du secteur où elles sont maximums.

Face à de tels abats d'eau, la réponse des débits est extrêmement rapide, de une à cinq heures selon la taille et les caractéristiques du bassin versant. D'ailleurs, sur la carte éditée par le Ministère de l'Environnement (IPGR, 1994) qui reprend les risques hydrologiques liés aux pluies intenses, l'axe défini ci-dessus par Staron (1993) est repris comme zone où les temps

de montée des crues sont inférieurs à 6 heures, requérant un suivi permanent de l'évolution des cellules pluvieuses. Des réponses aussi rapides des débits peuvent engendrer de lourds dégâts et des pertes en vie humaine, spécialement lorsque existent des facteurs aggravants.

Ce fut le cas à *Nîmes en 1988* où on a recensé 9 morts et 6500 sinistrés. Des pluies diluviennes (300 mm en 6 heures), tombant sur un sol préalablement saturé, ont provoqué des inondations dans le centre de la ville (Fabre, 1989). La convergence du réseau des Cadereaux (petits torrents généralement à sec) vers la zone urbaine où ils coulent alors en souterrain, le gradient altitudinal particulièrement élevé de leur bassin de réception qui de plus ont été soumis à une périurbanisation, tous ces éléments ont contribué à provoquer des dégâts considérables (Fig. 10). Pourtant de telles averses considérées ici comme pluricentennale (Davy, 1990) se sont produites dans les Cévennes sans que des dégâts considérables n'y soient signalés, rejoignant ainsi les constatations émises ci-dessus par Staron ainsi que les conclusions du rapport du Ministère de l'Environnement (IPGR, 1994), pour lequel le caractère exceptionnel des précipitations à Nîmes ne résiste pas à l'analyse statistique de la pluviométrie méditerranéenne et encore moins à celle des archives des événements hydrologiques qui ont affecté la ville au cours de la période historique.

La crue de *l'Ouvèze en septembre 1992* montre que la conjonction de paramètres peut aboutir à une véritable catastrophe (35 victimes à Vaison-la-Romaine). A l'origine, les pluies succédant à une première averse qui satura les sols, sont certes très importantes : entre 135 mm et 300 mm en 4 heures suivant les stations, l'isohyète de 200 mm couvrant 200 km² alors que le bassin versant à Vaison, s'étend

sur un peu moins de 600 km² (Gilard *et al.*, 1993). Mais comme on l'a vu, de telles pluies n'ont pas nécessairement un caractère catastrophique. Pourtant les dégâts ont atteint une ampleur considérable, détaillée dans plusieurs études très bien documentées.

L'Ouvèze traverse Vaison dans une cluse calcaire où se trouve le Pont romain qui s'élève à une dizaine de mètres au dessus du niveau d'étiages. Ce rétrécissement est la cause de la grande extension de l'inondation à l'amont, les basses terrasses furent inondées et la plus grande part des dégâts dans ce secteur résulte plus de la hauteur atteinte que de l'érosion. A noter que déjà lors de la crue de 1951 (dont on ne connaît malheureusement pas le débit), l'ampleur du champ d'inondation y avait été considérable, la rivière débordant sur la terrasse holocène ennoyant des cultures et divers aménagements (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993). En aval du Pont, les forts débits ont submergé la totalité du lit majeur, provoquant des dégâts matériels et humains et des bouleversements géomorphologiques considérables. Dans ce secteur, urbanisé jusqu'à la limite du lit mineur, les aménagements ont amplifié les effets de la crue et des reculs de berges atteignant 15 m ont été observés. Tout un lotissement de pavillons construits au bord de la rivière a été englouti sous 2 m d'eau et de nombreuses victimes ont été emportées par le flot. Dans le cours aval de l'Ouvèze, des ponts ont été détruits, d'autres ont été obstrués par des embâcles, provoquant des déversements du flux, la destruction de routes et de digues ainsi que des engravements dans le lit majeur (Flageollet *et al.*, 1993).

Différentes valeurs de débits ont été avancées car il subsiste un problème quant à son estimation précise lors de la crue de

septembre 1992, la station ayant été emportée bien avant le maximum de la crue. En utilisant différentes approches, Gilard *et al.* (1993) ont finalement estimé que le débit de pointe a atteint 1500 m³.s⁻¹ en amont de Vaison et, suite au laminage induit par le Pont Romain, un débit de 800 m³.s⁻¹ à l'aval.

La configuration du bassin de l'Ouvèze peut expliquer l'ampleur de la crue enregistrée puisque une série d'affluents convergent en moins d'une dizaine de kilomètres. Ces bassins versants de petite dimension ont un temps de réponse probablement très proche et il n'est pas exclu que leur pointe de crue aient pu se cumuler (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993). Mais comme le démontrent ces auteurs cette crue ne peut être comparée à d'autres crues de cours d'eau méditerranéens. En effet, en faisant appel à la cote Myer (C), définie de la façon suivante $C = Q / S^{1/2}$ (où Q est le débit maximum en m³.s⁻¹ et S la superficie du bassin versant en km²), on obtient un coefficient C = 62 pour l'Ouvèze contre 102 pour l'Ardèche et 151 pour le Gard. Comme le soulignent ces auteurs, il faut donc chercher dans les modalités d'occupation du sol et dans la gestion du lit même de la rivière, les raisons du caractère destructeur de cette crue.

Ces bassins très anthropisés depuis plusieurs millénaires ont subi depuis un siècle environ des modifications de l'occupation des sols; la rétraction agricole et la reconquête forestière sur le massif montagneux depuis la fin du XIX^e siècle, aurait pourtant dû réduire le ruissellement. En revanche, l'extension du vignoble sur les collines depuis l'après guerre fait que les parcelles sont plus grandes, impliquant souvent la disparition des terrassettes de jadis construites sur les plus fortes pentes. Il arrive parfois même qu'il y ait une restructuration du réseau hydrographique

élémentaire afin de l'adapter au nouveau parcellaire.

Au niveau de la gestion et de l'aménagement du lit des rivières, Arnaud-Passetta *et al.* (1993) soulignent l'impact de la mauvaise gestion voire de l'abandon de la ripisylve (forêt alluviale qui borde les cours d'eau) qui, avec beaucoup d'arbres vieillissants, a été le plus souvent arrachée, fournissant ainsi un matériel susceptible d'éroder les berges et les piles de pont mais surtout apte à constituer des embâcles. Quand ces barrages cèdent, ils sont alors à l'origine de véritables vagues de crues avec des phénomènes de lâchage d'embâcles en série. D'autre part, les digues et enrochements mis en place depuis la seconde guerre mondiale afin de gagner des terrains constructibles, ont eu pour effet de canaliser trop étroitement la rivière et d'accentuer la turbulence, fournissant en outre à la rivière des alluvions grossières qui ont permis un sapement efficace des berges. Enfin, il s'est clairement posé un problème de localisation des zones récentes d'urbanisation et de l'inadaptation flagrante du type de constructions adoptées.

Il est difficile de se protéger contre les crues éclairs, mais d'énormes progrès sont en cours de réalisation dans ce domaine. L'utilisation du radar permet non seulement de suivre les masses nuageuses et donc de localiser les zones susceptibles de recevoir des précipitations, mais aussi d'estimer l'intensité potentielle de ces pluies. Par ailleurs, la généralisation de la télémétrie, tant pour les précipitations que pour les débits, améliore l'efficacité des réseaux d'alerte. Toutefois, il est clair que la mesure la plus concrète reste la perception du risque d'inondation et la mise en place de stratégies de planification et d'aménagement. Comme le relève Masson (1993) au terme d'une analyse des inondations catastrophiques survenues dans l'ensemble des départements méditerranéens, les points

communs à ces drames sont des urbanisations et des aménagements implantés directement en lit majeur, des études hydrauliques basées sur la prise en compte de la crue décennale et trop optimistes vis-à-vis de la crue centennale, enfin une logique d'aménagement limitée à la prise en compte des seuls enjeux fonciers et aux travaux de l'écoulement des eaux. Masson conclut "... l'analyse des récentes inondations (...) met en évidence l'insuffisance des méthodes utilisées jusqu'ici pour prévoir, évaluer et faire prendre en compte objectivement le risque d'inondation par les aménageurs. Il devient urgent que ceux-ci reconnaissent enfin les possibilités offertes par d'autres approches, celles des sciences de la nature, et en particulier de la géomorphologie ...".

BIBLIOGRAPHIE

ARNAUD-FASSETTA, G., BALLAIS, J.L., BEGHIN, E., JORDA, M., MEFFRE, C., PROVANSAL, M., RODITIS, J.C. & SUANEZ, S. 1993. La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992), ses effets morphodynamiques, sa place dans le fonctionnement d'un géosystème anthropisé, *Revue de Géomorphologie dynamique*, 42(2): 34-48.

ASKEW, A. 1991. Vivre avec les crues; in *Les catastrophes naturelles sont-elles naturelles ?*, *Nature et Ressources*, 27(1): 4-9.

BAKER, V.B. & KOCHER, R.C. 1988. Flood sedimentation in bedrock fluvial systems; in *Flood Geomorphology*, Baker, V.B., Kocher, R.C. & Patton, P.C. (Eds), Wiley, 123-137.

CLARK, C. 1983. Les inondations, *Time-Life Books B.V.*, 176 p.

COSANDEY, C. 1994. Formation des crues "cévenoles" dans des bassins élémentaires du Mont Lozère, *Revue des Sciences de l'Eau*, 7, 377-393.

DAVY, L. 1989. Une catastrophe naturelle : l'averse nîmoise du 3 octobre 1988 et ses conséquences hydrologiques, *Revue d'Hydrologie Continentale*, 4, 75-92.

DUDGEON, D. 1995. River regulation in southern China : ecological implications, conservation and environmental management, *Regulated Rivers : Research & Management*, 11, 35-54.

FABRE, G. 1989. Les inondations catastrophiques de Nîmes et de sa région du lundi 3 octobre 1988, *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4): 224-230.

FLAGEOLLET, J.C., DE FRAIPONT, P., GOURBESVILLE, P., THOLEY, N. & TRAUTMANN, J. 1993. La crue de l'Ouvèze de septembre 1992 : origines, effets, enseignements; *Revue de Géomorphologie dynamique*, 42(2): 57-72.

GILARD, O., CHASTAN, B., GIVONE, P. & LAVABRE, J. 1993. La crue de l'Ouvèze du 22 septembre 1992 : difficultés d'estimation des débits observés, *Sécheresse*, 4, 165-170.

GONG, G. & XU, J. 1987. Environmental effects of human activities on rivers in the Huanghe-Huaihe-Haibe Plain, China, *Geografiska Annaler*, 69A (1):181-188.

GONG SHIYANG 1987. The role of reservoirs and silt-trap dams in reducing sediment delivery into the Yellow River, *Geografiska Annaler*, 69A(1):173-179.

HIRSCHBOECK, K.K. 1988. Flood hydro-climatology, in *Flood Geomorphology*, Baker, V.B., Kocher, R.C. & Patton, P.C. (Eds), Wiley, 27-49.

HOOKE, J.M. 1986. Applicable and applied geomorphology of rivers, *Geography*, 1-13.

IPGR (Institut de Prévention et de gestion des risques urbains) 1994. Ruissellement pluvial urbain, Guide de prévention, évaluation du risque, éléments de méthode; La documentation française; Ministère de l'Environnement, Paris, 85 p.

JANSON, M.B. 1982. Land erosion by water in different climates, Uppsala Universitet Naturgeografiska Institutionen, Rapport Nr 57, 151 p.

LI, S. & FINLAYSON, B. 1993. Flood management on the lower Yellow River : hydrological and geomorphological perspectives, *Sedimentary Geology*, 8, 285-296.

LOUP, J. 1974. Les eaux terrestres, Masson, 171 p.

MASSON, M. 1993. Après Vaison-la-Roaine, Pour une approche pluridisciplinaire de la prévision et de la planification, *Revue de Géomorphologie dynamique*, 42(2): 73-77.

MORISAWA, M., 1985. Rivers, form and process, Longman, 222 p.

PARRETT, C., MELCHER, N.B. & JAMES R.W., 1993. Flood discharges in the Upper Mississippi River Basin, 1993; US Geol. Survey Circular, 1120-A, 14 p.

PERRY, C.A. 1994. Effects of reservoirs on flood discharges in the Kansas and the Missouri River Basins, 1993; US Geol. Survey Circular 1120-E, 20p.

SMITH, K. 1993. Riverine flood hazard, *Geography*, 78(2) : 182-185.

STARON, G. 1993. Chronologie des catastrophes pluvieuses dans le sud de la France, *Revue de Géographie de Lyon*, 68(2-3): 91-100.

STEVENS, M.A., SIMONS, D.B. & SCHUMM, S.A. 1975. Man-induced changes of Middle Mississippi River, *Journal of the Waterways Division*, 101 : 119-135.

WARD, R. 1978 : Floods, a geographical perspective; Macmillan Press, 244 p.

WINKLEY, B.R. 1982 : Response of the Lower Mississippi to river training and realignment; in Hey, R.D., Bathurst, J.C. & Thorne, C.F. (Eds), *Gravel-Bed Rivers*, Chichester, Wiley, 659-682.

Adresse de l'auteur :
François PETIT, Chargé de Cours
Département de géographie physique,
Institut de géographie
Université de Liège
Allée du 6-Août, 2 - Bat. B11
4000 - LIÈGE