

PHENOMENES HYDROLOGIQUES EXTREMES -
SECHERESSES ET CRUES EXCEPTIONNELLES

par J.A. Rodier

Pour l'évaluation des ressources en eau de surface d'un pays ou d'une région on donne généralement à la détermination des débits moyens annuels et à l'étude du bilan une très grande importance, et c'est tout à fait normal, mais on passe parfois sous silence la méthodologie d'étude des données extrêmes: sécheresses et crues exceptionnelles, et c'est regrettable, car ces données extrêmes peuvent jouer un très grand rôle dans la conception des projets d'aménagement. Dans bien des cas, il est nécessaire de connaître les modalités de remplissage d'un réservoir artificiel en cas de sécheresse et il existe des barrages pour lesquels l'ouvrage qui évacue la crue du projet coûte plus cher que le reste de l'aménagement, ce qui impose une analyse correcte de la crue exceptionnelle. Au niveau de la planification de l'aménagement des ressources en eau, les données concernant les sécheresses peuvent imposer des priorités absolues: exploitation intégrée des ressources en eaux souterraines et superficielles, priorité en zones arides à l'aménagement de certains grands fleuves dont les apports restent suffisants même en cas de déficits hydriques exceptionnels. Les crues exceptionnelles lorsqu'elles sont particulièrement dévastatrices peuvent transformer les règles d'aménagement de toutes les zones basses.

Le moindre intérêt que l'on peut porter à ces données extrêmes tient un peu à leur rareté.

Au cours d'une sécheresse et immédiatement après, les hydrologues comme l'opinion publique sont sensibilisés à ces phénomènes - cela a été le cas en Europe occidentale en 1921 - puis peu à peu l'intérêt tombe et trente ans après on a même quelques difficultés à rassembler les données de la sécheresse en question.

Avant la dernière sécheresse au Sahel, très peu d'hydrologues s'étaient intéressés aux sécheresses antérieures, et pourtant il existait déjà au moins les données de la sécheresse de 1940-1945.

La même attitude peut être observée pour les crues exceptionnelles.

Une autre raison pour laquelle les études sur ces valeurs extrêmes sont moins nombreuses est la très grande difficulté d'étude rationnelle de ce sujet pour un bon nombre de régimes hydrologiques.

Cependant, de grands efforts ont été accomplis dans ce domaine de l'hydrologie sur le plan national comme sur le plan international.

Certains pays, comme la Grande-Bretagne, ont procédé à une étude exhaustive des crues sur leur territoire; on entreprend actuellement une étude générale des crues en Europe; dans le cadre de la DHI et du PHI, l'Unesco a mis au point un rapport méthodologique pour le calcul des débits de crues et un répertoire des débits des grandes crues qui porte déjà sur 35 pays. Le répertoire AISH qui lui fait suite portera sur 35 pays supplémentaires avec une remise à jour à la date de 1980 des données publiées dans le premier ouvrage.

De très nombreux rapports Unesco/OMM ont été publiés à l'occasion de la dernière sécheresse du Sahel. Citons parmi les plus anciens: le rapport Davy, la note technique de Hounam et J.C. Rodda (No. 138) sur la sécheresse et l'agriculture, le rapport présenté par l'AISH (en coopération avec l'OMM) à la Conférence organisée conjointement par l'Unesco et l'OMM en 1974 sur les résultats de la Décennie Hydrologique Internationale, le rapport Unesco/OMM sur les aspects hydrologiques de la sécheresse dont nous avons extrait quelques éléments pour cette conférence. Enfin, la coopération bilatérale française a apporté son support financier et ses directives pour un certain nombre de rapports moins généraux dont certains seront cités plus loin. On passera rapidement en revue quelques-uns des problèmes posés par les données hydrologiques extrêmes, les solutions qui y seront apportées dans différents cas, les mesures que l'on peut prendre pour remédier aux conséquences financières désastreuses de ces deux catégories de phénomènes et quelques recommandations sur les recherches à faire.

PARTIE I - SECHERESSES

Les premiers problèmes que l'on rencontre sont des problèmes de définitions; celle du type de sécheresse, celle des caractéristiques qui devront être quantifiées.

Il s'agit d'appréhender le phénomène sous tous ses aspects, ce qui est beaucoup plus délicat que pour les crues.

Les études statistiques et la détermination des périodes de retour ne sont pas non plus très aisées.

Définitions: De façon générale il y a sécheresse lorsqu'il se produit pendant un temps assez long (mois, année ou suite d'années) et sur une superficie notable (au moins 20.000 - 100.000 km²) un déficit de disponibilités naturelles en eau par rapport à la valeur moyenne de ces disponibilités qui comportent les précipitations, les écoulements superficiels et souterrains.

Les aspects de la sécheresse varient beaucoup suivant le type de ressources affecté par ce phénomène naturel et suivant le type d'activité économique le plus touché. Un déficit dans les précipitations survenant à une période critique pour la végétation est considéré à juste titre comme une sécheresse par les agriculteurs, ce n'est pas une sécheresse pour les producteurs d'électricité si l'hiver précédent et le début du printemps ont été assez pluvieux, les réservoirs étant alors pleins. Ainsi l'élevage, l'agriculture avec ou sans irrigation, la production hydroélectrique, l'approvisionnement en eau domestique, la navigation peuvent être affectés par divers types de sécheresse. Un bon nombre d'entre elles concernant l'agriculture et l'élevage ont fait l'objet de la note technique très exhaustive de l'OMM citée plus haut.

Dans cette conférence on ne considérera que les aspects hydrologiques de la sécheresse et presque exclusivement ceux qui concernent les eaux de surface. La sécheresse hydrologique est caractérisée par un déficit par rapport à la situation normale des conditions de l'écoulement superficiel et des nappes souterraines. Le déficit des précipitations ne sera considéré que comme facteur de la sécheresse hydrologique.

Même en restreignant de cette façon la notion de la sécheresse il reste encore bien des choses à définir. Le choix de la période de base joue un rôle essentiel pour définir une sécheresse, qu'il s'agisse de la décade, du mois, de la saison, de l'année ou d'une série d'années comme on le verra plus loin. Il faut également pouvoir quantifier la sécheresse; on peut considérer les notions de pluviosité ou d'hydraulicité définies respectivement, comme le rapport de la hauteur de précipitation ou du débit moyen pendant la période de base (un mois sec ou une année sèche par exemple) à la valeur moyenne interannuelle de cette

hauteur de précipitation (moyenne relative au mois considéré ou à l'année) ou à la valeur moyenne interannuelle du débit. On peut également considérer au lieu du rapport le déficit par rapport aux moyennes interannuelles, ou la fréquence, comme c'est le cas en Australie où on admet qu'une sécheresse de fréquence inférieure à 5% est une sécheresse sévère, par exemple.

Il y a divers aspects à considérer, même pour la sécheresse hydrologique. Le rapport Unesco/OMM considère six catégories caractérisées par :

- Un déficit de l'écoulement superficiel d'une durée de trois semaines à trois mois pendant la période de germination et de croissance des plantes (intéresse notamment les cultures sèches ou les cultures irriguées sans réservoir de régularisation).
- Des débits inférieurs de façon significative aux valeurs moyennes pendant la période de basses eaux (alimentation en eau des villages et de certaines villes).
- Un déficit significatif du débit moyen annuel (concerne la production d'énergie hydroélectrique ou l'irrigation avec de grands réservoirs).
- Un niveau maximum annuel du cours d'eau nettement en dessous de la valeur moyenne de ces niveaux maximaux (concerne des irrigations sans pompage).
- Une sécheresse continue pendant plusieurs années (Seccas du Nordeste du Brésil et de certaines parties de l'Australie).
- Une baisse significative du niveau des aquifères dans l'hypothèse où le volume annuel d'eau qu'on en extrait reste constant et voisin du volume correspondant à l'équilibre de la nappe: hypothèse toute théorique, car lorsqu'il y a sécheresse on surexploite les nappes.

Les sécheresses très sévères correspondent généralement à la fois aux six types définis ci-dessus.

Caractères des sécheresses

Le caractère le plus important est la persistance du déficit qui peut durer plusieurs semaines, plusieurs mois ou plusieurs années. Dans le cas de la sécheresse du Sahel, de 1968 à 1981, le déficit a été observé tous les ans, au Tchad par exemple; dans ce cas, la persistance est évidente. Mais elle est souvent difficile à mettre en évidence de façon mathématique par suite de l'hétérogénéité spatio-temporelle des sécheresses dont il sera question plus loin. On étudie généralement la persistance à partir des précipitations, car les séries d'observations sont plus longues et s'il y a persistance pour les précipitations, le phénomène est encore plus net pour les débits, puisque souvent les débits moyens annuels ne sont pas indépendants. Pour une année qui suit une année sèche, la probabilité est plus forte que 0,5 de trouver une année encore déficitaire, par

suite du déficit de saturation des sols et de la situation des lacs qui existent dans le bassin versant. Notre collègue Max Beran a passé en revue dans le rapport Unesco/OMM un bon nombre d'études sur la persistance de la sécheresse à partir des pluies annuelles; elles présentent des résultats souvent contradictoires pour diverses raisons: l'une d'entre elles est la prise en compte simultanée de régions voisines mais à régimes pluviométriques différents. En ce qui concerne le Sahel, Brunet Moret a prouvé cette persistance de façon très nette pour des hauteurs de précipitations annuelles moyennes inférieures à 1000 mm.

Si l'on appelle x les valeurs des précipitations annuelles observées et z une valeur aléatoire et indépendante, les valeurs successives de x sont liées par le processus:

$$x'_{i+1} = z'_{i+1} + Ax'_i$$

Pour le Sahel, A est positif de façon significative et voisin de 0,24.

Cette persistance n'est pas significative plus au sud en Afrique Occidentale pour des hauteurs de précipitations annuelles supérieures à 1000 mm.

Mais si au lieu de considérer les précipitations, on analyse les débits moyens annuels calculés en années hydrologiques, cette persistance est nette au moins pour le Niger supérieur. Le même auteur a trouvé pour la station de Koulikoro avec une série de 73 ans un coefficient d'auto-corrélation de 0,423.

En définitive, le phénomène de persistance paraît assez général au niveau des débits pour des sécheresses sévères. A noter qu'il est encore mieux marqué pour des périodes très humides.

Un second caractère est la double hétérogénéité spatiale et temporelle. Dans la zone affectée par la sécheresse, il y a des zones relativement épargnées et d'autres pour lesquelles au contraire la sécheresse est plus sévère qu'ailleurs. La sécheresse dite du Sahel, dont un des paroxysmes peut être situé en 1972-1973, a affecté tout autour du globe une large bande zonale dans les régions tropicales, les zones équatoriales n'ayant pas en général connu de déficit.

La carte No. 1 mise au point à partir des croquis de "Données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale" par J. Sircoulon (1976) présente les déficits des précipitations en pourcentage pour l'année 1972: le déficit est inférieur à 30% dans certains points de la Haute-Volta et du Tchad, alors qu'il atteint 70% pour des régions de même régime pluviométrique au Sénégal.

La carte No. 2 est extraite d'une publication régulière du Bureau de Météorologie de l'Australie. On y a représenté les zones de sécheresse "sérieuse" et de sécheresse "sévère". Ces qualificatifs ont déjà été définis précédemment. Le Sud-Est de l'Australie et la Tasmanie mettent bien en évidence une très grande hétérogénéité. On retrouverait des caractéristiques analogues pour la sécheresse

de 1976 en Europe Occidentale. On a observé à Paris, par exemple, une averse exceptionnelle, au milieu de cette sécheresse, ce qui évidemment a perturbé sérieusement les isohyètes mensuelles.

Ceci impose dans l'analyse d'une sécheresse de considérer le phénomène global et non pas uniquement en un seul point. Cette analyse globale est faite automatiquement lorsque l'on considère la sécheresse à partir des débits d'un grand bassin fluvial.

L'hétérogénéité est observée également dans le temps, qu'il s'agisse de sécheresses durant plusieurs mois au plusieurs années. Dans le premier cas, un épisode pluvieux comme nous venons de l'indiquer peut se produire au milieu d'une période sèche. Lorsqu'il s'agit de sécheresses durant plusieurs années, il est assez fréquent de trouver des années excédentaires au cours de la sécheresse. Par exemple, pour la sécheresse du Sahel de 1965-1980, on a observé en 1970 ou en 1974, en de nombreux points, des débits moyens annuels excédentaires. Il en a été de même pour la sécheresse de 1913 dans les mêmes régions. Cette hétérogénéité temporelle complique également l'analyse. Comme nous le montrerons plus loin, pour de nombreux régimes hydrologiques on observe des successions de périodes sèches et humides, qui semblent parfois se reproduire à intervalles réguliers, ce qui a conduit à mettre en cause des cycles rattachés ou non aux périodes d'activités solaires. Comme pour la persistance, les cycles d'années sèches ont donné lieu à des discussions interminables, mais jusqu'ici il ne semble pas que l'on ait prouvé de façon irréfutable que ces successions plus ou moins irrégulières de périodes soient plus caractéristiques que celles que donnerait un simple tirage au hasard. Même si on arrive à prouver qu'il y a une superposition de plusieurs cycles, il semble difficile de penser que l'on puisse avant longtemps utiliser ces cycles pour prévoir la fin ou le début d'une grande sécheresse, même à une année près.

Causes des sécheresses

La cause de la sécheresse hydrologique est un déficit des précipitations souvent lié à une répartition des averses peu favorable à l'écoulement. Mais quelle est la cause de ce déficit pluviométrique? Les phénomènes qui en sont responsables diffèrent suivant qu'il s'agit de sécheresses de quelques mois ou de séries de plusieurs années sèches, les processus étant beaucoup plus mal connus dans le second cas que dans le premier. Les problèmes sont différents également suivant qu'il s'agit de sécheresse aux latitudes moyennes ou de sécheresse tropicale.

Une sécheresse est une combinaison d'événements météorologiques dotés d'une certaine persistance et qui est susceptible de se reproduire un bon nombre de fois à faible intervalle de temps.

La sécheresse, sur le plan météorologique, n'est pas de caractère local mais est plutôt un problème à étudier de façon globale, par suite des intercon-

nexions entre les divers éléments de la circulation générale de l'atmosphère.

Dans les régions tempérées, une sécheresse régionale est généralement caractérisée par la présence d'air chaud et sec dans la troposphère moyenne. Cette masse d'air chaud s'abaisse lentement. C'est le phénomène de subsidence. Cette situation est de nature à empêcher toute averse et même en saison chaude elle gêne la croissance des cumulus. Il y a en plus une certaine tendance à ce que cette situation reste stable.

Le phénomène de subsidence est associé surtout pendant la saison chaude à des cellules de haute pression, surtout dans la troposphère moyenne et de temps en temps à faible altitude. Au cours des sécheresses on relève des cellules de hautes pressions océaniques associées aux cellules de hautes pressions continentales séparées par des zones de dépression. Chaque cellule de haute pression génératrice de sécheresse a besoin pour pouvoir se maintenir d'une autre cellule de haute pression qui lui est associée bien qu'elle soit située à plusieurs milliers de km. Il y a plusieurs explications à ce phénomène dont l'exposé nous entraînerait trop loin.

La température en surface des Océans SST joue un rôle important dans le maintien de la situation de sécheresse. Des anomalies positives de la température de l'océan sont associées avec des anticyclones qu'elles contribuent à entretenir. L'étude des relations air-océan constitue une des bases des recherches qui permettront de prévoir les sécheresses.

Les séries de sécheresses sur plusieurs années sont très difficiles à expliquer. Il est invraisemblable que l'atmosphère présente sans aucune action extérieure des mécanismes répétitifs pendant un temps aussi long. On a souvent invoqué l'action des variations de l'énergie solaire reçues, mais, comme nous l'avons déjà dit, ceci est encore très loin d'être prouvé de façon indiscutable. Nous parlerons plus loin de l'influence de l'homme.

Dans les régions tropicales, les précipitations sont souvent liées à un mécanisme de mousson et une perturbation dans ce mécanisme peut donner naissance à la sécheresse.

En Afrique Occidentale, on sait que les déplacements de masses d'air qui provoquent la mousson sont commandés par la position et les caractéristiques de l'anticyclone de Ste. Hélène et de la dépression estivale saharienne. Pendant la dernière sécheresse au Sahel, cette dépression occupait une position plus méridionale que d'habitude, il en était de même de la zone intertropicale de convergence. Mais en plus de ces facteurs régionaux d'autres facteurs extratropicaux jouent peut-être un rôle plus important, en particulier ceux liés à la circulation générale de l'atmosphère. Notamment l'affaiblissement et la position anormalement méridionale de l'anticyclone de Ste. Hélène sont liés à une sécheresse en Afrique Occidentale y compris le Sahel (qui ne représente qu'une faible partie de la

superficie affectée par la sécheresse 1968-1980 en Afrique). Ces phénomènes semblent être associés à un affaiblissement du front polaire antarctique. De 1970 à 1972, une puissante anomalie positive de la pression au niveau de la mer a été observée sur l'antarctique, ce qui correspond à un affaiblissement de l'activité des westerlies dans le sud atlantique. Là également, la SST est liée à ces phénomènes et il y aura peut-être des perspectives de prévisions dans un bon nombre d'années. A noter qu'un front polaire très actif donne lieu à une saison des pluies excédentaire en Afrique Occidentale. On trouve encore l'influence du front polaire antarctique dans la genèse des sécheresses aux Indes et en Australie. On montrera plus loin qu'il y a d'ailleurs un bon nombre de ressemblances entre les séries d'années sèches et humides aux Indes et en Afrique. Quant à remonter aux causes de ces périodes de forte ou de faible activité de ce front, ceci est une autre histoire.

Dans le rapport Unesco/OMM, on a passé en revue tous les aspects de l'influence de l'homme sur le climat: 1) action directe: augmentation de la teneur en CO₂, diminution de la teneur en ozone dans la stratosphère, action des aérosols, échauffement de l'atmosphère par les rejets thermiques; 2) action indirecte: surpâturage (avec les modifications d'albedo qui en résultent), irrigation, drainage, modification de la qualité de l'eau, etc. Parmi les premiers facteurs, le plus important paraît être l'augmentation de la teneur de l'air en CO₂: suivant les estimations, si la teneur en CO₂ était doublée, l'augmentation moyenne de température qui en résulterait varierait entre 3° et 0,4° C. Mais des études sur modèles tendent à indiquer qu'un réchauffement global conduirait plutôt à réduire les risques de sécheresse. De toute façon, au cours des deux dernières décennies, on note un léger abaissement moyen de la température. Pour les facteurs indirects, leur influence sur la sécheresse en est encore aux études préliminaires et n'a pas pu jusqu'ici être quantifiée, mais dans l'avenir l'influence de l'homme sera de plus en plus importante. Il est à noter que les divers facteurs qui y sont associés ont souvent des effets contradictoires.

Etude des sécheresses

On éprouve d'abord des difficultés particulières à quantifier les caractéristiques des sécheresses: leur sévérité et leur durée. Il est nécessaire de classifier la sécheresse grâce à des séries d'observations des précipitations de niveaux ou de débits aussi longues que possible, puis de fixer la période de retour ou de la sévérité ou de la durée.

Pour quantifier la sévérité de la sécheresse on utilise, comme il a été indiqué plus haut, le déficit ou l'hydraulicité. Dans les zones tempérées on peut admettre qu'un déficit de 65 à 85% correspond à une période sèche, un déficit de

85 à 100% une période très sèche. Mais ces "fourchettes" varient avec le climat. En zone aride, les mêmes qualificatifs se rapprochent d'un déficit de 100%, c'est pourquoi en Australie on quantifie les sécheresses à partir de leur période de retour, comme ceci a été indiqué plus haut. Pour les sécheresses de basses eaux, on considère le débit minimum sur des périodes de n jours consécutifs: $n = 5-10-50$ jours, etc. Les études sur la durée supposent une définition précise du début et de la fin de la sécheresse, on doit alors choisir un seuil de hauteur de précipitation, qui est souvent zéro, ou de débit. Pour classifier convenablement les sécheresses, il convient d'allonger le plus possible les séries d'observations, surtout lorsqu'on étudie des sécheresses portant sur des séries d'années; on utilise alors des enquêtes historiques ou géomorphologiques portant sur les lacs ou d'autres indicateurs. Ces enquêtes sont généralement plus difficiles que pour les crues.

L'analyse des précipitations doit se faire sur un plan global. Ceci est une conséquence de l'hétérogénéité de la sécheresse; on utilise des groupes de relevés de stations pluviométriques.

L'analyse des débits rencontre une première difficulté, celle de l'évaluation des débits de basses eaux: les vitesses sont extrêmement faibles; en outre, pour les sécheresses passées, les débits sont obtenus par extrapolation de la courbe de tarage vers le bas, et cette extrapolation est beaucoup plus aléatoire que pour les hautes eaux, des erreurs de 100% étant possibles même dans des conditions favorables.

Pour les rivières à saison des pluies bien définies, l'analyse la plus importante est souvent celle des débits moyens annuels. Or il n'y a pas de loi de distribution universellement applicable, d'autant plus que la position des points expérimentaux sur la courbe de distribution indique une loi de distribution différente de celle qui caractérise 85 à 95% des autres années, et ceci est logique puisqu'en période de sécheresse les réserves souterraines dont l'influence est sensible d'ordinaire sont épuisées, ou il ne subsiste qu'une seule nappe dont le débit vers la rivière varie très lentement, l'influence de cette nappe ou de ces nappes étant peu sensible en année normale ou excédentaire; d'autres facteurs physiques peuvent avoir le même effet. En région tropicale, alors que la courbe de distribution se rapproche d'une distribution normale pour 90% des années, les débits peuvent décroître beaucoup moins que dans le cas d'une distribution normale en années sèches. Ceci ne facilite pas la détermination de la période de retour et nécessite de procéder, après avoir ajusté la loi de distribution par les méthodes classiques, à un report graphique qui peut prendre en compte les témoignages historiques. Mais il convient alors de se montrer exigeant sur le choix de la formule à adopter pour déterminer la fréquence expérimentale. Il faut prendre au moins la formule de Hazen $F = \frac{n-1/2}{N}$. Il serait préférable de choisir des formules telles que $F = \frac{n-3/8}{N+1/4}$ pour les N distributions

que l'on soupçonne d'être normales ou qui s'y rattachent; cela paraîtra peut-être un détail dérisoire, mais c'est une des conditions à remplir pour déterminer correctement la période de retour.

Aperçu sur les sécheresses récentes

Le rapport Unesco/OMM présente une analyse générale des grandes sécheresses hydrologiques pour les zones tropicales et les zones tempérées.

La dernière sécheresse tropicale qui n'est peut-être pas terminée à l'heure actuelle a couvert, comme nous l'avons déjà dit, une bande zonale couvrant à peu près toutes les régions tropicales exception faite des régions voisines de l'Equateur. Le graphique No. 3 donne une idée de l'extension et de la sévérité de cette sécheresse. Sans tenir compte de la durée et en ne prenant en compte que les débits moyens annuels qui conviennent bien en ces régions à saison des pluies bien définie, on a porté en ordonnées les périodes de retour de ces débits moyens annuels pour l'année ou les années les plus sèches pour divers cours d'eau choisis dans les différentes régions tropicales précisées en bas du graphique; le nom du cours d'eau est porté à côté du point représentatif le plus élevé pour chaque rivière. L'année la plus sèche est généralement 1972 ou 1973. On trouve des périodes de retour de 75 à 100 ans pour des cours d'eau de l'Afrique Occidentale, du Tchad, de l'Angola, de l'Inde et du Brésil, des périodes de retour de 50 ans pour presque toutes les régions tropicales. C'est le Sahel tropical africain qui a peut-être connu les dommages les plus graves, mais en ce qui concerne la sévérité de la sécheresse 65-80, des régions tropicales humides ont été également défavorisées: la plupart des grands fleuves sur la ligne des 100 ans ont la majeure partie de leur bassin actif en région tropicale humide. Pour les parties les plus arides du Sahel, il est difficile de fixer une période de retour, car dès que l'on atteint une période de retour de 20 à 50 ans, l'écoulement annuel est nul; mais ceci n'est pas exact pour tous les cours d'eau sub-désertiques du sud du Sahara. Aucun cours d'eau équatorial ne figure sur ce graphique. L'année la plus sèche observée sur l'Ogooué serait représentée par un point sur la ligne "5 ans"; on trouve le même résultat pour l'Amazone.

De telles sécheresses se sont produites vers 1940 et surtout vers 1913, mais il semble maintenant que la sécheresse actuelle a duré plus longtemps que la sécheresse de 1913. Pour comparer les différentes périodes de sécheresse pour plusieurs régions tropicales, on a utilisé le graphique No. 4 qui a été établi en utilisant un indice sans dimension imaginé par B. Bredenkamp pour le rapport AISH/OMM que nous avons mis au point ensemble. Nous avons considéré 12 stations hydrométriques, la plupart sur des grands fleuves, tous en Afrique au nord de l'Equateur. Pour la période où ces 12 stations ont toutes été observées chaque année sèche de

période de retour de 5 ans ou plus pour une station donnée correspond à -1 , chaque année humide de période de retour de 5 ans ou plus correspond à $+1$. Pour des années de période de retour inférieure pour une station donnée, on compte zéro. Chaque année on fait le total pour les 12 stations; on notera que pour 1972, le total est égal à -11 ; l'année a été sèche partout, avec une période de retour supérieure à 5 ans pour toutes les stations sauf une. Pour les années où toutes les stations n'ont pas été observées, on multiplie les valeurs $+1$ ou -1 par un facteur correctif. Par exemple, de 1911 à 1921, quatre stations seulement ont été observées, le facteur correctif est égal à $12/4$. Pour les années anciennes bien entendu, le chiffre global ainsi obtenu est moins sûr et il y a une légère chance de surestimation. On voit très nettement la sécheresse de 1904 à 1913, celle de 1939 à 1945, celle de 1968 à 1980, les derniers chiffres étant ceux de 1978. On voit très bien aussi la période humide de 1954 à 1967. Mais pour une étude aussi globale l'hétérogénéité temporelle est évidente.

Le même travail a été fait pour l'Inde plus le Mékong, avec 7 stations au lieu de 11. On retrouve quelques analogies surtout pour la dernière sécheresse, et c'est normal puisque les sécheresses dans ces deux cas sont liées toutes deux à l'activité du front polaire antarctique; mais la seconde moitié de la sécheresse de 1913 n'apparaît pas et la sécheresse de 1940 est à peine visible.

D'autres comparaisons moins systématiques ont été faites avec l'Amérique du Sud et l'Australie. On pouvait espérer que de telles comparaisons entre l'hémisphère nord et l'hémisphère austral permettraient des prévisions en temps réel à échéance de six mois.

Les résultats sont décevants, on trouve bien des analogies frappantes, les sécheresses de 1970 et de 1913 sont bien apparentes dans de nombreux cas, mais il peut y avoir des décalages de un ou deux ans dans la date du paroxysme. Pour certaines grandes régions tropicales, des sécheresses importantes comme celle de 1940 y sont à peu près inconnues, par contre celle de 1953, peu marquée en Afrique Occidentale, est plus nette en Amérique du Sud. Ces différences sont logiques; la différence de configuration des continents joue un grand rôle, de même que la différence d'exposition, l'existence de grandes chaînes de montagnes. En conclusion, pour le moment on ne peut pas utiliser directement de telles comparaisons pour la prévision des sécheresses. Mais peut-être que de telles études plus poussées, malgré de grandes difficultés, permettraient de trouver des zones étendues dans l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud, avec un assez bon synchronisme, ou de trouver des corrections permettant de tenir compte du manque de synchronisme. Mon collègue Max Beran a utilisé le procédé décrit plus haut pour présenter les sécheresses successives des régions tempérées, mais dans ce cas on prend en compte l'écoulement de la période d'été au lieu de l'écoulement annuel, car le manque de saison des pluies bien définie rend moins net que pour

les régions tropicales l'examen des sécheresses à partir de l'écoulement annuel. Trois grandes régions sont considérées, les régions maritimes occidentales (Europe et Amérique), les régions semi-continentales (Nord et Est de l'Europe, parties importantes des Etats-Unis), les prairies-steppes (Etats-Unis et Canada). Là aussi, les sécheresses se présentent par groupes, certaines sécheresses comme celles de 1921 et de 1976 se retrouvent à peu près partout, mais d'une région à une autre il y a de grandes différences.

A côté de la prévision en temps réel, la prédétermination des sécheresses correspondant à une fréquence donnée est un élément pratique important de l'étude des sécheresses. Cette prédétermination a pour objet de déterminer les écoulements en période de sécheresse pour un cours d'eau pour lequel on ne dispose pas de longues séries d'observations des débits. En Grande-Bretagne, l'emploi de régressions multiples entre les caractéristiques des débits de sécheresse et les caractéristiques importantes du bassin (étendue, climat, morphologie, sol et sous-sol). Cette méthode a été étendue aux pays africains et méditerranéens. Pour simplifier, cette méthode considère le débit de basses eaux annuel moyen pour les 10 jours les plus secs: MAM (10). Des régressions multiples ont été mises au point à partir de 500 stations de jaugeage entre MAM (10) et les caractéristiques des bassins. Des relations internes ont été élaborées pour allier entre elles les courbes de fréquence correspondant à différentes durées. On a utilisé le rapport du MAM (10) pour chaque station à la moyenne des débits sur une longue période, ce qui élimine la grandeur du bassin et au moins une partie de l'influence du climat. On a constaté que le facteur géologique était le plus significatif. Un indice géologique a été défini, l'indice d'écoulement de base: rapport de l'écoulement de base à l'écoulement total. Il est en très bon accord, en Grande-Bretagne, avec la nature géologique du sol, comme le montre le rapport des valeurs de cet index qui varie de 0,1-0,2 pour les terrains très imperméables, à près de 1 pour les bassins possédant de très grandes réserves souterraines. Pour déterminer les courbes de fréquences MAM (D), on a remarqué que l'espacement entre ces courbes pour un bassin donné dépendait de MAM (10) : courbes très serrées pour MAM (10) ou indice d'écoulement de base élevée, courbes très écartées pour des valeurs faibles de MAM (10) ou du même indice. On est ainsi arrivé à un ensemble de courbes de fréquences types (de 1 à 10) pour le MAM (10).

Au Sahel, l'ORSTOM a mis au point une méthode présentant de nombreuses analogies avec la précédente: les écoulements ne se produisant que sur une courte période, 2 à 5 mois, la caractéristique choisie pour étudier la sécheresse est l'écoulement annuel en mm avec sa courbe de fréquence jusqu'à l'année centennale sèche.

Comme il n'existe que très peu de rivières observées sur une longue période, on a reconstitué sur les bassins représentatifs des séries d'écoulements annuels, crue par crue, à partir des précipitations annuelles, averse par averse, grâce à un modèle simplifié mis au point par G. Girard qui n'est utilisable que dans les régions tropicales sèches. Cette reconstitution avait été précédée d'une analyse très poussée des précipitations annuelles au Sahel. Il a été nécessaire de diviser les bassins versants en 6 catégories de superficie: la superficie du bassin versant joue un grand rôle au Sahel. Dans chaque catégorie on a trouvé ensuite les bassins suivant les caractéristiques du sol et la pente: chaque groupe étant représenté par un bassin type: là aussi, la nature géologique du bassin joue un rôle essentiel. Pour le bassin type observé pendant 3 ou 4 ans, on a reconstitué une longue série d'écoulements annuels grâce au modèle indiqué plus haut, on a déduit de cette série la courbe de distribution de ces écoulements annuels correspondant au régime pluviométrique du bassin. Il est assez facile pour un bassin type recevant par exemple en moyenne 450 mm par an, de reconstituer la courbe de distribution pour le même bassin dans l'hypothèse où il recevrait en moyenne une hauteur de précipitation annuelle quelconque comprise entre 250 et 750 mm avec la distribution temporelle des averses et les intensités usuelles dans les régimes sahéliens tropicaux. Chaque bassin type est représenté par une famille de courbes de distribution, chacune correspondant à une hauteur de précipitation annuelle donnée.

Le bassin à étudier est classé parmi les divers bassins types, ce qui ne peut être fait que par un hydrologue confirmé, et par interpolation on trace la courbe de distribution entre celles de deux bassins types correspondant à la même hauteur de précipitation annuelle, d'où on déduit les écoulements annuels de périodes de retour 50 ou 100 ans. Ceci n'est valable que pour des bassins de moins de 1000 m².

La prévision en temps réel des sécheresses est extrêmement difficile, sauf lorsqu'il s'agit de prévoir au moyen de la courbe de récession les débits de la fin du tarissement pour une rivière à période de hautes eaux et de basses eaux bien définie, et encore convient-il de prévoir sans trop d'incertitude la date du début de la prochaine série des pluies, ce qui n'est pas particulièrement facile. Les prévisions météorologiques intéressant les sécheresses sont des prévisions à long terme, il est parfois possible de prévoir le début et la fin de la sécheresse, mais ce n'est pas facile.

J. Namias a énuméré dans le rapport Unesco/OMM les méthodes suivantes:

Méthodes analogiques à partir d'une situation analogue dans le passé.

Ces méthodes ont des limites par suite de la faible longueur des périodes d'observation des paramètres étudiés.

Emploi de régressions linéaires: $Y = ba + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$, Y étant une pression ou une température ou un indice global caractérisant la situation météorologique, les variables X étant les valeurs antécédentes des températures

et des pressions, la SST, le vent, l'extension des glaces et même parfois le nombre de taches solaires. L'estimation des coefficients $b_1 b_n$ est très délicate, là aussi la faible durée des observations ne facilite pas les choses et généralement les résultats ne sont pas très brillants, sauf dans certains cas: quelques réussites à signaler dans le cas de régions tropicales ou de la partie méridionale de l'URSS où les problèmes se posent de façon relativement simple, encore ne prévoit-on que le caractère de l'été suivant ou de la saison des pluies.

Relations entre deux facteurs avec utilisation de cartes de téléconnexion, telles les liaisons entre la SST et le temps sur le continent voisin: cette méthode peut fournir de premières indications de tendance.

Méthodes statistiques et cinématiques pour la prévision des tendances à long terme dans le système des vents pour des périodes de plusieurs mois.

Tables de contingence

Utilisation des interactions air-océans: cette méthode a déjà donné des résultats très convaincants.

Il reste enfin les cycles dont nous avons parlé plus haut. Les méthodes hydrologiques ne peuvent pas évidemment prévoir le début de la sécheresse: elles comportent la méthode de la courbe de récession, les méthodes de régressions multiples qui suivent une méthodologie analogue aux prévisions météorologiques, mais parmi les variables on retrouve l'humidité du sol, l'état des aquifères. Les prévisions des basses eaux, dans le cas de rivières alimentées par la fonte des neiges utilisent bien entendu, comme variable, l'équivalent en eau ou l'étendue du manteau neigeux, et donnent d'assez bons résultats, et enfin les cycles de débit.

En conclusion, la prévision à long terme des températures ne dépasse pas 65% dans les meilleurs cas, 60% pour les précipitations dans les meilleurs cas.

Cette fastidieuse énumération des méthodes met déjà en évidence une partie des recherches à entreprendre pour répondre aux problèmes concrets posés par des sécheresses. Nous avons dans notre rapport fait un certain nombre de recommandations à ce sujet.

1. Tout d'abord, le problème des définitions n'est pas totalement résolu, il reste à rechercher des indices qui permettent par exemple de définir facilement un seuil d'alerte pour les utilisateurs. Plusieurs indices seront nécessaires et une certaine standardisation sera bien utile, sans oublier la diversité des situations. L'indice d'hydraulicité convient à Electricité de France, mais serait peu utilisable pour un fermier d'Australie.

2. Comme presque toujours, le problème des données est essentiel. On a répété ici un bon nombre de fois les difficultés qui résultaient de la relative brièveté des observations, qu'il s'agisse d'observations de temps, de la

température des océans, des données climatologiques, plus particulièrement des précipitations et des débits. On n'insistera jamais assez sur l'importance d'une bonne exploitation des réseaux météorologiques (y compris la climatologie) et hydrométriques. Mais ceci ne suffit pas, il faut en période de sécheresse procéder à des études systématiques des précipitations, débits, fluctuations des nappes. Dans la même catégorie se situent les études historiques qui sont à encourager, et leurs résultats doivent être comparés. Les conséquences économiques des sécheresses ne sont pas à négliger.

3. Les recherches sur les variations temporelles et surtout spatiales des débits ou des précipitations pendant les sécheresses sont également à pousser. Parmi ces recherches, celles sur la persistance ou l'existence de cycles devront prendre une place très importante sous réserve qu'elles soient faites sur une base saine. Bien des contradictions sur les résultats obtenus dans ces deux types de recherches sont dues au fait que cette dernière réserve n'a pas été prise en compte. A noter que les cycles sont liés aux changements de climat dont les répercussions devront être étudiées non seulement sur les moyennes, mais aussi sur les valeurs extrêmes. Le programme sur le climat mondial W.C.P. devrait prendre en compte les conséquences hydrologiques en particulier les sécheresses.

4. Dans les causes et la prévision des sécheresses, on se bute partout à l'insuffisance de nos connaissances en ce qui concerne leur mécanisme. Les recherches globales sur les interactions air-océan sont de nature à accroître notre connaissance des mécanismes. Les grands programmes internationaux en cours, météorologiques et océanographiques devraient être poussés au maximum et devraient prendre en compte les conséquences des phénomènes observés sur la sécheresse. Ils devraient être effectués en liaison avec les hydrologues afin de juxtaposer les causes météorologiques et les effets hydrologiques plus proches des utilisateurs.

Dans l'étude des mécanismes, les influences actuelles et futures des activités de l'homme ne sont pas à négliger, mais elles doivent porter non seulement sur les moyennes, mais aussi sur les sécheresses.

5. L'aspect humain de la lutte contre la sécheresse est également très important. Comment organiser les systèmes d'aménagement des ressources en eau pour obtenir en cas de sécheresse les meilleurs résultats? Comment doivent être orientées les réactions des populations affectées, etc. ?

6. La plupart de ces recommandations supposent la coopération internationale à partir des organisations gouvernementales et non-gouvernementales existantes, outre la poursuite des grands programmes en cours et la prise en compte du problème des sécheresses par ces programmes, comme ceci a été indiqué plus haut.

Un certain nombre d'actions spécifiques ont été recommandées: pour effectuer la liaison entre économistes et hydrologistes, un rapporteur devrait passer en revue la documentation concernant l'aménagement et l'exploitation des ressources en eau. La mise au point d'un rapport type sur les sécheresses permettrait d'obtenir plus facilement des résultats comparables.

Des groupes de travail conjoints entre les organisations internationales s'occupant d'hydrologie scientifique, telles que l'Unesco, l'OMM et l'AISH, et les organisations représentant les utilisateurs, telles que la FAO, l'ICID, etc. pourraient être très utiles pour les recherches concernant les réactions des utilisateurs à la sécheresse et les moyens de lutte contre ses conséquences. Pour terminer, nous dirons quelques mots sur ce dernier sujet:

Limitation des dommages résultant des sécheresses: ce qui suit est inspiré d'un remarquable rapport de Jean Tixeront, présenté au Colloque de New Delhi:

Le judicieux aménagement de systèmes de réservoirs peut permettre de régulariser plus ou moins les débits. Dans les zones arides, la priorité doit être donnée à l'aménagement des grands cours d'eau venant de zones non arides, cours d'eau dont le débit moyen annuel ne devient pas négligeable dans les grandes sécheresses, mais ceci ne doit pas conduire à l'abandon de l'aménagement des cours d'eau ayant leur origine en zone aride. Mais de toute façon, il n'est pas concevable d'aménager les ressources en eaux superficielles sans tirer parti des ressources en eaux souterraines. Dans de nombreux cas, l'aménagement intégré des deux types de ressources paraît nécessaire. A ces aménagements s'ajoute la réduction du gaspillage en eau et, dans la mesure où elles deviendront opérationnelles, la réduction artificielle de l'évaporation et la pluie artificielle. Mais dans beaucoup de pays touchés par la sécheresse et surtout dans les zones arides, toutes ces techniques se rattachant à l'hydraulique s'avèrent insuffisantes en cas de grandes sécheresses. Elles doivent être complétées par des mesures d'ordre économique: les assurances jouent un grand rôle, ainsi que les échanges internationaux de production effectués si possible dans les meilleures conditions par les divers partenaires, ce qui n'est pas toujours le cas, l'assistance internationale, enfin les déplacements de main d'oeuvre, solution qui est la moins souhaitable mais parfois la seule possible.

La solution dans chaque pays est une combinaison de toutes ces mesures, qui est rarement la même pour deux pays. Tout doit être prévu avant la sécheresse; pendant, il est souvent trop tard. Une fois encore, ces mesures de lutte contre la sécheresse peuvent difficilement se concevoir sans la coopération internationale.

PARTIE II - QUELQUES REFLEXIONS SUR LES CRUES EXCEPTIONNELLES
ET LES METHODES DE LEUR EVALUATION

Comme nous l'avons déjà dit, les caractéristiques des crues exceptionnelles jouent un rôle important dans la conception des aménagements hydrauliques, leur exploitation et même parfois dans l'aménagement du territoire.

Au stade de l'étude des aménagements, l'hydrologue est confronté en particulier avec le problème, redoutable en général, de la crue du projet (design, flood) dont la fréquence est variable suivant l'importance de l'ouvrage et surtout suivant les conséquences de la rupture de cet ouvrage par la crue en question. Cette fréquence peut varier de 0,1 pour un petit ouvrage dont la rupture serait sans conséquence grave, à 0,0001 pour un grand barrage, quoiqu'en hydrologie on est un peu gêné lorsqu'on aborde des fréquences aussi faibles avec le peu de moyens dont on dispose. Cette impression est d'ailleurs à la base de cette conférence.

Pourtant les problèmes sont beaucoup plus faciles à cerner que pour les sécheresses. La crue correspond à un site bien déterminé et non à une superficie variable d'un événement à l'autre, les données à déterminer sont moins nombreuses et bien définies pour les plus importantes: le débit de pointe, le volume de la crue, parfois la forme de l'hydrogramme et plus rarement la masse de sédiments transportés.

Mais dans les cas de faibles fréquences, l'estimation de ces données est délicate. Nous ne parlerons pas des crues décennales dont les caractéristiques peuvent être déterminées assez facilement avec sécurité et une précision relativement bonne pour les grands cours d'eau, parce que maintenant les données des réseaux sont disponibles pour presque tous les pays du monde, grâce aux efforts fait sur le plan national et sur le plan international. Dans bien des cas, ces données concernent à la fois les grandes et les petites rivières et s'étendent sur au moins deux ou trois décades. Avec 30 ans d'observations des débits, 50 ans d'observations des pluies, on peut faire une bonne estimation de ces crues décennales.

Pour les crues millénales et décamillénales, le problème se pose de façon bien différente. Dans des cas relativement favorables, on dispose d'observations des débits maximaux sur 50 à 70 ans à un site voisin du site à étudier ou sur une rivière de même régime, et de 50 à 100 ans d'observations des précipitations. Avec un échantillon de 50 à 70 crues, on veut estimer le débit d'une crue de période de retour égale à 10.000 ans. Un statisticien n'ayant jamais fait d'hydrologie aurait de bonnes raisons de douter du bon sens des hydrologues. Et encore convient-il d'ajouter à ceci que les plus forts débits connus sont déterminés

par extrapolation à partir de mesures correspondant à des débits qui sont assez souvent inférieurs à 50% du débit maximum observé! Mais heureusement l'hydrologue ne se trouve pas devant une population statistique dont il ne connaît rien. Il a quelques notions sur les causes physiques de ces crues, ce qui peut lui permettre d'avoir à priori quelques idées sur la forme de la courbe de distribution. Encore convient-il de faire un effort pour connaître les processus physiques de la genèse des crues. Trop souvent on voit calculer une crue millénaire avec 30 malheureuses valeurs du maximum annuel, sans étude approfondie du mécanisme des crues et sans connaissance suffisante du bassin versant.

Nous allons passer en revue les principaux types de crues exceptionnelles classées à partir de l'allure générale des courbes de distribution. Elles varient dans une très large mesure d'un régime hydrologique à un autre, et ceci explique pourquoi les méthodologies d'estimation des crues exceptionnelles adoptées de préférence dans telle région du monde sont différentes de la méthodologie que l'on préfère dans d'autres; ceci explique aussi bon nombre de controverses entre hydrologues formés dans des régions de types de crues tout à fait différents.

Courbe de distribution à direction asymptotique ou à asymptote

1. Il y a d'abord le cas le plus simple et assez peu connu où la courbe de distribution admet une asymptote. Nous éliminons le cas où cette asymptote correspond au sommet de l'échelle ou au niveau de l'enregistreur, ce qui arrive quelquefois. Il ne faut admettre cette distribution que lorsqu'elle a une cause physique bien connue. Par exemple, lorsqu'il s'agit d'une rivière à plaine d'inondation de très grande largeur - 50 à 500 km pour un chenal principal de 300 m à 1 km - en région tropicale. Le débit qui transite dans ce chenal est le seul qui parvienne à l'aval: il admet une limite supérieure. La figure 1 qui correspond à une station du Logone dans son cours inférieur ne donne pas à première vue une démonstration évidente de l'existence d'une asymptote. Mais nous avons tenu à la présenter, car elle donne un bon exemple de l'action de l'homme. En effet, après la grande crue de 1955, on a construit de très longues digues sur les deux rives du chenal principal, ce qui a renforcé artificiellement le débit passant dans ce chenal, d'où les deux crues de 1969 et de 1970 qui dépassent de plus de 10% la limite de $932 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'état naturel. Notons que les crues de 1969 et 1970 à l'amont de la grande zone d'inondations sont nettement plus faibles (débit de pointe et volume) que la crue de 1955. La position anormale de ces deux points étant expliquée, on voit bien l'asymptote de cette courbe de distribution. On doit retrouver des phénomènes analogues sur le Nil Blanc. Un bon nombre de fleuves tropicaux dans leur cours inférieur présentent

des débits qui croissent très peu vers les faibles fréquences par suite de débordements extrêmement importants. Même certains grands cours d'eau sahéliens, comme le Ba Tha au Tchad, ont cette propriété. On observe des phénomènes du même genre pour les rivières dont les bassins versants comportent un grand nombre de lacs.

2. Distribution normale: Dans deux cas, pour de grands bassins en régime tropical humide avec assez faible relief et sans cyclone, ou en régime nival de plaine, les crues exceptionnelles résultent en principe d'un seul genre de phénomènes: saison des pluies très abondante ou fonte d'une forte épaisseur de neige. On trouve très souvent des distributions de Gauss ou qui en sont très voisines: c'est le cas du Sénégal à l'amont du bief inférieur (Sénégal à Bakel) ou du Dniepr à Smolensk. Il y a là des raisons physiques qui expliquent cette distribution; d'ailleurs dans les deux cas on dispose de grands fleuves dont on connaît les grandes crues pendant plusieurs siècles. Le Nil, sur le plan statistique, correspond à un fleuve tropical puisque le Nil Blanc, seul titulaire équatorial, correspond à peu près à un débit maximum constant. On dispose sur ce fleuve de 14 siècles d'observations du maximum et on peut certifier que la courbe de distribution est très proche d'une courbe de Gauss malgré les quelques défauts que l'on peut reprocher aux données du milomètre de Rodda.

Pour cette seconde catégorie, l'emploi de la courbe de distribution des débits pour l'estimation des débits de crues exceptionnelles est tout à fait justifié et tous les calculs statistiques sont permis, même si on doit prendre comme variable le logarithme des débits pour des courbes ne s'écartant pas trop de la courbe de Gauss. Mais il existe quand même dans ce cas des pièges. Par exemple jusqu'en 1961, le Congo présentait une courbe de distribution presque normale, puis est survenue la grande crue de 1961 dont le point représentatif était très au-dessus de la courbe, et on n'expliquait cette position que par le choix de fréquences extrêmement faibles et peu vraisemblables. L'explication physique est simple: la crue est polygénique et l'on trouve sur le Congo deux catégories de crues, soit une saison des pluies abondante sur un ou plusieurs des trois formateurs principaux - Oubangui, Congo, Kasai, soit la coïncidence plus ou moins bonne des débits de pointe de ces trois cours d'eau, comme cela s'est produit en 1961. L'échantillon statistique comporte donc deux populations avec des lois de distribution différentes.

3. Distributions hypergaussiques dans les mêmes régions: Dans les secteurs amonts des cours d'eau de cette catégorie et également dans les bassins de montagne, la distribution devient généralement hypergaussique, avec une loi de distribution qu'on peut rattacher à la loi de Goodrich ou même à la loi

log-normale, et là l'emploi des courbes de distribution de débit pour retrouver les débits de crues exceptionnelles est déjà nettement plus délicat.

4. Régions tempérées: Même si on sépare de ces régions les zones méditerranéennes, les courbes de distribution des valeurs maximales sont déjà nettement asymétriques.

5. Dans les régions arides et une bonne partie des régions méditerranéennes, les coefficients d'asymétrie sont élevés ou même très élevés. La figure 1 montre l'exemple de l'oued Mellègue en Tunisie, cours d'eau méditerranéen à la limite des zones arides. La loi qui s'ajuste le mieux est une loi log-normale avec un coefficient d'asymétrie qui atteint 5,48, et ce n'est pas là une valeur maximale.

Dans bien des cas, on est conduit à utiliser d'autres lois qui peuvent admettre des coefficients d'asymétrie plus élevés, comme la loi log-Pearson III, très utilisée aux Etats-Unis. Mais chaque fois le choix de la loi et de ses paramètres est très délicat.

6. Régions affectées par les cyclones: Enfin, dans ces régions, les coefficients d'asymétrie sont également très élevés. La figure 1 reproduit la courbe de distribution de la Vohitra à Andekaleka (Madagascar). Nous avons songé à présenter le Choshui dans la province de Taïwan (Chine) qui correspond probablement à un record du monde pour la violence des crues, avec une pointe de $7800 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1979 pour un bassin versant de 260 km^2 , mais étant donné que les très fortes crues y sont fréquentes, la courbe de distribution est moins caractéristique. Les bassins frappés par les Cloud Burst peuvent être rangés dans cette catégorie. Nous mettons à part le cas de certaines rivières de l'Himalaya et de la Cordillère des Andes, où des crues exceptionnelles sont produites par la formation, puis la rupture d'un barrage naturel. Dans ce cas, le débit maximum de crue n'a que peu de rapport avec la superficie du bassin versant, et à priori une étude statistique paraît difficile à envisager. Tout ceci montre que l'analyse statistique des débits de crues se présente de façon très différente suivant les cas. Dans la seconde catégorie (grands fleuves tropicaux, régime nival de plaine) avec une série de relevés de 50 ou 80 ans, on peut procéder à une étude statistique tout à fait valable. Pour les rivières des 5ème et 6ème catégories, on se retrouve par exemple avec une série de quarante crues annuelles dont les plus fortes n'atteignent pas des valeurs très élevées, et devant un ou deux débits maximaux très élevés. Comment ajuster convenablement une courbe de distribution sur tout cela?

Notons à ce propos que la plupart des tests d'ajustement ont pour objet de vérifier si la loi de distribution choisie s'adapte bien à l'ensemble des points représentatifs ou à la partie centrale de la courbe expérimentale. Or c'est la partie supérieure de cette courbe qui nous intéresse. Il faut que le test choisi pour vérifier la valeur de la loi de distribution choisie corresponde à l'ajustement pour la partie supérieure. Comme pour les sécheresses, il est bon de procéder à une vérification graphique, et alors le choix de la formule avec laquelle on définit la fréquence expérimentale est très important. On arrive aux mêmes conclusions que dans le cas des sécheresses. Le report graphique permet de tenir compte plus facilement des crues historiques et de la fréquence du point le plus élevé, fréquence dont on a quelquefois une vague idée.

Même avec toutes ces précautions, l'hydrologue n'est pas souvent en mesure de déterminer les paramètres d'une courbe de distribution qui corresponde à la réalité. Peut-on au moins voir si on s'en écarte de beaucoup? Le calcul correct de l'intervalle de confiance est difficile si la loi n'est pas normale, et la prudence s'impose pour les transformations $\log Q$ et \sqrt{Q} lorsque les courbes sont assez asymétriques, et finalement on trouve dans les cas difficiles un intervalle de l'ordre de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ - $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ qui déclanchera une franche hilarité chez l'ingénieur auquel l'hydrologue présentera cet intervalle.

Les études de V.R. Baker, R. Craig Kochel et P.C. Patton sur le Rio Pecos, telles qu'elles ont été présentées dans une très bonne communication au Colloque de Canberra (1979), montrent très bien les difficultés du problème. Sur le Rio Pecos, dans la région d'Arenosa, les dépôts apportés par l'eau à la hauteur maximale des grandes crues peuvent subsister dans certains endroits protégés le long des gorges de ce cours d'eau. On peut dater par l'analyse au carbone 14 les matériaux les plus convenables de ces délaissés des grandes crues. Il a été assez facile d'évaluer les débits correspondants à ces hauteurs maximales, les auteurs disposant ainsi de traces de ces crues pour une période de 9500 ans. La célèbre crue de 1954, dont le débit de pointe a été estimé à $27440 \text{ m}^3/\text{s}$ provenant de 9300 km^2 a pu être classée parmi les crues les plus anciennes déterminées avec les délaissés de crues, et on a pu ainsi déterminer sa période de retour à 2000 ans. La figure extraite de cette communication montre bien toute l'incertitude sur le tracé de la partie extrême des courbes de fréquence: la courbe (a) a été établie à partir des débits maximaux annuels observés, y compris la crue de 1954; la courbe (c) a été établie sans tenir compte de cette crue de 1954; la courbe (b) a été établie avec les débits de pointe reconstitués à partir des données des délaissés de crues et des données des relevés réguliers. Elle doit être assez proche de la "vraie courbe". Notons que les périodes de retour sont en coordonnées logarithmiques.

On peut en conclure qu'au moins pour la plupart des cours d'eau correspondant à nos 5ème et 6ème catégories, l'analyse statistique des débits ne peut pas à elle seule permettre de déterminer la crue de projet; par contre, c'est souvent possible avec des cours d'eau de la 1ère et 2ème catégories.

Etude du mécanisme des crues

Dans ces conditions, l'étude approfondie des bassins versants et du mécanisme des crues peut rendre l'analyse plus sûre. On peut en donner un exemple dans le cas des cours d'eau de zones arides: l'étude des zones imperméables et du degré de dégradation hydrographique est alors d'un grand secours. S'il n'y a pas de dégradation avec un sol peu perméable, la courbe de fréquence est souvent gaussio-logarithmique. S'il y a une forte dégradation, le régime des crues peut être plus irrégulier, avec des coefficients d'asymétrie qui atteignent et dépassent des valeurs de 3 ou 4. Mais pour certaines formes de dégradation et en région pas trop aride, on peut trouver des courbes assez proches de la distribution normale, ce cas étant toutefois assez rare. C'est en partie pour donner des éléments sur le mécanisme de la genèse des crues en cas de fonte des neiges que l'Unesco a publié son catalogue des grandes crues qui contient un bon échantillonnage d'exemples de très grandes crues provenant de la fonte des neiges sur de grands cours d'eau. Dans le cas d'études de crues pour lesquelles on dispose de temps et de moyens matériels, l'aménagement de petits bassins représentatifs sur certains sols caractéristiques du bassin à étudier peut donner pour certains régimes des notions précises sur le ruissellement; cette étude sur bassin représentatif peut montrer qu'en cas de crue exceptionnelle, telle ou telle partie du bassin est susceptible de ruisseler à 100%. Mais même combinée avec l'analyse statistique des débits, l'étude du bassin et de son comportement en cas de grande crue ne suffit pas toujours à donner une estimation sûre de la crue de projet. Alors que faire?

Méthodes basées sur les précipitations

Il est normal d'avoir recours aux précipitations et en particulier de chercher à évaluer l'averse exceptionnelle correspondant à la crue du projet. Notons qu'il est difficilement concevable de procéder à une étude du mécanisme de ruissellement lors des grandes crues sans procéder à un minimum d'études sur les précipitations qui sont à l'origine de ce ruissellement, mais dans le cas présent l'étude des précipitations est très approfondie et constitue la partie essentielle de l'évaluation du débit de crue exceptionnelle. L'analyse des précipitations a par rapport à l'analyse des débits de multiples avantages.

Dans de nombreux cas on dispose pour les pluies de séries régulières d'observations plus longues que pour les débits, le schéma des épisodes pluvieux est plus proche des mécanismes météorologiques qui sont à la base de la genèse des crues exceptionnelles, enfin sur de vastes régions homogènes la connaissance d'un bon nombre de séries d'observations pluviométriques peut suppléer dans une mesure difficile à évaluer à la relative brièveté des périodes d'observations. Une des méthodes qui a été très employée est celle de la précipitation maximale probable (PMP): 1. Pour une surface donnée on détermine la masse d'eau maximale qui peut être contenue dans la colonne d'air qui surmonte cette surface. 2. Compte tenu de la vitesse du vent, on évalue la masse d'eau maximale qui passe au-dessus de la même surface en un temps donné. 3. On détermine le rendement maximal de la transformation de cette eau en précipitations. Il faut alors transformer ces pluies en débit et déterminer le débit maximal. L'évaluation de la PMP est évidemment plus simple en plaine qu'en montagne. Une carte des PMP a été établie pour les Etats-Unis. Avec des bases très saines cette méthode est séduisante, mais elle suppose de bonnes connaissances des données météorologiques dont on ne dispose pas pour beaucoup de pays, et surtout elle entraîne celui qui l'utilise à prendre tout au long des diverses opérations qu'elle nécessite une série de marges de sécurité, de sorte qu'elle donne une limite supérieure de la crue du projet qui doit souvent dépasser de beaucoup ce que serait la crue réelle.

Herschfield a utilisé son immense expérience des précipitations aux Etats-Unis pour donner une formule simplifiée de la PMP:

$$X_{\max} = \bar{X} + kS \qquad X_{\max} = \text{PMP} \qquad \begin{array}{l} \bar{X} \text{ moyenne des précipitations} \\ \text{maximales annuelles} \\ S \text{ leur écart type} \\ k \approx 15 \end{array}$$

Il y a intérêt à procéder à cette évaluation pour plusieurs postes pluviométriques d'un même régime. Mais là encore on arrive souvent à une surestimation de la crue de projet.

P. Guillot et D. Duband, sans rechercher le maximum de précipitations cherchent le gradient de la loi de fréquence. Ils prennent pour les précipitations et les débits en mm la même unité de temps voisine de la durée de l'hydrogramme de ruissellement (temps de base) et admettent deux hypothèses:

1. Que la rétention moyenne atteint sa limite pratique lors des crues de période de retour supérieure à 10 ou 20 ans. Notons que cette limite pratique ne correspond pas obligatoirement à la saturation complète des aquifères.
2. Que la fréquence des pluies pour des précipitations journalières ou horaires est à décroissance exponentielle $e^{-\frac{x}{a}}$, ce qui se traduit sur le

graphique de Gumbel par une droite de pente a . C'est cette pente qu'on appelle le Gradex, lequel a donné son nom à la méthode. Cette seconde hypothèse est largement vérifiée. Le Gradex est un paramètre climatique qui peut être cartographié. Les auteurs ont constaté pour de nombreuses régions que l'on pouvait arriver à une estimation correcte de ce gradex avec 20 ans d'observations pluviométriques de bonne qualité.

Il résulte de ces deux hypothèses de base que si l'on considère les courbes de distribution des précipitations et des débits avec comme unité commune de temps le temps de base, la partie supérieure de ces courbes tracées sur un graphique de Gumbel est formée de droites parallèles.

Dans ces conditions, l'estimation de la crue du projet comporte les étapes suivantes:

1. Détermination du temps de base.
2. Etude de la loi de distribution des averses de durée égale au temps de base et détermination du gradex.
3. Traçage de la courbe expérimentale de fréquence des débits jusqu'à une période de retour de 10, ou mieux 20 ans.
4. Extrapolation par une pente de droite égale au gradex de la pluie.
5. Détermination grâce aux hydrogrammes des crues connues du rapport entre le débit de pointe et le débit moyen calculé sur une durée égale au temps de base.

Cette méthode donne de bons résultats dans de très nombreux cas correspondants à nos catégories 3, 4, 5 et 6.

Elle ne s'applique pas directement aux grands bassins, à ceux pour lesquels il est évident que la première hypothèse, rétention moyenne à sa limite pratique, ne peut pas être vérifiée, et aux cas pour lesquels une durée de 20 ans d'observations ne permet pas de déterminer le gradex, ce qui est assez rare.

En outre, quelques problèmes délicats sont parfois à résoudre: il n'est pas évident que dans tous les cas les précipitations pour une durée donnée suivent une distribution de Gumbel; le temps de base est parfois délicat à déterminer; enfin, le rapport entre le débit de pointe et le débit moyen pendant le temps de base peut poser des problèmes. En définitive, il y a des cas hors des catégories 1 et 2 où la méthode du gradex ne peut pas s'appliquer, par exemple par manque de données pluviométriques de bonne qualité ou parce qu'il faut plus de 20 ans pour le déterminer, et ceci est d'autant plus gênant lorsqu'on sait à priori que les crues à prévoir sont très violentes.

Dans de telles conditions il est prudent de passer en revue les plus fortes crues connues pour le régime hydrologique auquel appartient le cours

d'eau quel'on a à étudier. C'est un peu l'idée qui est à la base des vieilles méthodes des courbes-enveloppes, mais on considère cet examen des crues maximales non comme une méthode de détermination de la crue du projet, mais comme la recherche d'une valeur de débit au-dessus de laquelle doit obligatoirement se placer la crue du projet. Encore convient-il de faciliter cet examen et, derrière les chiffres, d'avoir une idée des caractéristiques des divers bassins.

Graeger, dans *Engineering for Dams*, avait donné une première liste de ces crues maximales. En 1961, le Professeur Maurice Pardé publiait un ouvrage fort important "Sur la puissance des crues en diverses parties du monde", avec une liste beaucoup plus complète correspondant à plus de 30 ans de collectes systématiques de données sur les crues maximales couvrant presque le monde entier. Divers coefficients caractérisaient la violence des crues, le plus simple et le plus pratique étant $A = \frac{Q_{max}}{\sqrt{S}}$. Mon collègue Francou, en reportant les points représentatifs sur un graphique, avec la superficie du bassin en coordonnées logarithmiques et le débit maximal en coordonnées logarithmiques, a constaté que pour un régime hydrologique donné les points correspondants aux cours d'eau présentant les crues les plus violentes s'alignaient sur une droite dont la pente peut servir précisément à caractériser la violence des crues. Cette pente étant désignée par a , on a adopté comme coefficient représentatif $K = 10(1-a)$. K varie pratiquement de 0 à 6. En 1967 nous avons complété la série des données de M. Pardé et publié cette liste. En 1976 l'Unesco publiait son répertoire mondial des très fortes crues qui portait sur 35 pays apportant des compléments très importants. L'AISH a entrepris fin 1976 de continuer cette tâche sous la forme d'un catalogue des crues maximales qui sera pratiquement achevé fin 1981. Les données de 70 pays seront représentées, y compris les données recueillies par l'Unesco et celles des ouvrages antérieurs du même genre, après contrôle et correction chaque fois que les hydrologues des divers pays intéressés ont procédé à une réévaluation des données anciennes, y compris les débits de crues historiques. L'objection que l'on fait habituellement à l'utilisation de ce genre de données est que pour une rivière donnée et à plus forte raison pour une région donnée, les valeurs maximales croissent continuellement et très largement au fur et à mesure que le temps passe. Mais comme l'a remarqué Z.P. Kovacs, pour une bonne partie de l'Afrique australe, les valeurs maximales tendent à devenir beaucoup plus stables après quelques décennies, les données utilisées par Craeger ont déjà au moins 50 ans et il est un fait: c'est que la droite limite que l'on peut déjà tracer à partir des données du répertoire de l'AISH est à peu près la même que celle que l'on aurait pu tracer

avec les données de M. Pardé il y a 20 ans, mais elle s'appuie sur beaucoup plus de points. La majeure partie des points représentatifs correspondent à une période de retour de 50 à 100 ans, mais il est certain que cette période est très supérieure pour quelques-uns d'entre eux. On a vu que celui du Rio Pecos correspond à 2000 ans; la crue de 1501 sur le Danube a probablement une période de retour du même ordre de grandeur.

Ceci ne veut pas dire qu'à l'avenir il faudra calculer la valeur K du coefficient de Francou pour le régime hydrologique que l'on étudie, et à partir de cette valeur K choisir le débit correspondant comme débit de crue du projet. Si le bassin de la rivière et le régime hydrologique ont les mêmes caractéristiques que celles d'une station du catalogue, la valeur K sert à calculer un débit auquel le débit de crue du projet doit être nettement supérieur. C'est déjà un élément non négligeable pour l'évaluation de ce débit de crue. Dans certains pays, on a mis au point des formules empiriques pour déterminer K. Ces méthodes nécessitent une connaissance parfaite des bassins des rivières. On ne parlera pas ici des formules empiriques qui sont surtout valables pour des fréquences pas trop faibles, 0,1 à 0,001.

En définitive, on voit que pour l'évaluation du débit de crue du projet, les méthodologies à utiliser varient très largement d'une région du monde à l'autre, et bien des controverses seraient évitées si on évitait de trop généraliser les résultats obtenus pour certains régimes hydrologiques à d'autres. De toute façon, il est nécessaire pour procéder à de telles évaluations:

1. de très bien connaître le bassin versant et le régime de la rivière dont on veut étudier les crues.
2. d'employer plusieurs approches et de confronter les résultats. On devra garder présent à l'esprit le fait que dans certains cas aucune méthode n'est vraiment bonne.
3. ne pas perdre de vue l'influence de l'homme sur le ruissellement en cas de fortes crues. L'action des grands réservoirs est évidente - ils sont souvent faits pour cela - mais l'influence de l'aménagement rationnel ou non des sols et de la couverture végétale du bassin n'est plus négligeable dans bien des cas, et on oublie que les longues séries de débits ne sont plus homogènes dans beaucoup de cas.

A la lumière de ce qui vient d'être dit, j'ai cru utile d'insister sur un certain nombre de priorités pour les études et recherches susceptibles de faciliter l'estimation des crues de projet:

1. Faire tout pour allonger les séries de débits maximaux annuels: (a) en continuant à exploiter sérieusement les réseaux hydrométriques et en les développant dans un bon nombre de pays. Malgré ce qui a été dit plus haut, il est plus commode de disposer d'une série de 50 valeurs que d'une série de 20.

(b) en poussant à fond les enquêtes sur les crues anciennes, y compris des recherches telles que celles conduites sur le Rio Pecos, chaque fois que c'est possible, ce qui n'est malheureusement pas fréquent. C'est impossible, par exemple, pour la Devil River située dans la même région.

2. Tenir à jour dans chaque pays un catalogue des crues maximales et publier tous les 20 ans par exemple un répertoire à l'échelle mondiale. On devrait recommander dans les services hydrologiques de faire une courte publication avec le plus de données possible peu de temps après chaque série de crues exceptionnelles. Il est à noter que sur le plan international le Bulletin de l'OMM publie chaque année un article sur les événements exceptionnels de l'année écoulée.

3. Intensifier les études sur les précipitations exceptionnelles et surtout sur les diagrammes d'intensité en liaison avec la circulation générale de l'atmosphère. Il en est de même pour les cas de fontes des neiges à caractère exceptionnel. Ceci suppose que les réseaux pluviométriques voient la qualité de leurs données s'améliorer continuellement. On ne doit pas oublier que le régime des précipitations est nettement moins altéré par l'influence humaine que le régime des débits. Bientôt il sera beaucoup plus difficile de trouver des séries homogènes de débits maximaux que des séries homogènes de précipitations.

4. Pousser davantage les recherches sur le mécanisme des crues en fonction des conditions climatologiques et physiologiques: ceci comprend les recherches sur les relations et les modèles pluies-débits, sur la forme des hydrogrammes, etc.

5. Faire progresser l'étude de l'influence de l'homme sur l'écoulement, et plus particulièrement sur le régime des crues.

Nous achèverons cette conférence par quelques rappels des mesures à prendre pour lutter contre les conséquences des crues exceptionnelles, en notant qu'il est plus facile que pour les sécheresses de résoudre ce genre de problèmes par des mesures purement techniques.

1. L'aménagement de grands réservoirs pour l'amortissement des crues est le premier type de mesures qui vient à l'esprit, mais ces réservoirs deviennent si nombreux que l'exploitation rationnelle de ces systèmes de réservoirs devient une nécessité absolue, et malheureusement il ne semble pas que cela soit réalisé dans tous les cas.

2. Une seconde série de mesures plus rationnelles s'attaque aux causes des crues: il s'agit des techniques ayant pour objet la conservation de l'eau et du sol, comprenant la reforestation, l'aménagement rationnel des sols avec bandes d'arrêt, banquettes, etc. A noter qu'il n'est pas rare de constater



en cas de crues exceptionnelles que des aménagements de ce genre qui n'ont pas été conçus pour des averses assez fortes et assez continues aggravent la violence des crues au lieu de la réduire.

3. Dans certains cas, il est impossible de résoudre les problèmes de crues exceptionnelles par les mesures qui viennent d'être énumérées, ou ces travaux s'étalant sur un bon nombre d'années il faut prévoir d'autres dispositions dans l'intervalle. Il faut alors prévoir l'aménagement des vallées en vue de réduire les dégâts. Ces mesures comportent des endiguements, des digues fusibles, le libre passage des eaux dans une partie des plaines d'inondation pour préserver le reste.

4. Enfin, dans la plupart des cas, un système efficace d'annonce et de prévision des crues s'impose.

Toutes ces dispositions doivent être prises après une étude des relations coût-bénéfice et dans le cadre de l'aménagement intégré des bassins.