

## REGIME HYDROLOGIQUE DU MEKONG ET DE SES AFFLUENTS.

**Evaluation des ressources hydrauliques : Recueil et traitements des données**

*Guiscafré Jacques \**

*- Résumé.*

Le Mékong Inférieur, avec ses affluents, est sous l'influence de la "mousson d'Asie du sud-est"; il en subit toutes les fluctuations dues à son irrégularité interrannuelle et les perturbations orographiques et climatiques qu'entraîne la façade maritime orientale de la Péninsule Indochinoise; le régime pluviométrique et, par suite, le régime hydrologique et hydrographique ont de grandes variations spatiales et temporelles.

Cette irrégularité accentue la nécessité de disposer, dans le temps et l'espace, des données nécessaires à l'élaboration des projets, donc de les recueillir et de les gérer.

---

\* O.R.S.T.O.M., Laboratoire d'Hydrologie, Montpellier - France.

## LE MEKONG

Le Mékong est, avec 4200 km de long, le troisième fleuve de l'Asie après le Yang et le Gange et le huitième du monde par le débit. Son bassin de 795 000 km<sup>2</sup> se partage entre le monde chinois (25 %) et la péninsule indochinoise (75 %) à l'est du 101ème parallèle.

Le Mékong (en chinois, Lancangjiang) prend sa source à 4 875 mètres d'altitude, dans les chaînes neigeuses du Tanggulashan sur le grand plateau tibétain où il porte le nom de Dze Chu (l'eau des rochers). Il traverse les montagnes du Yunnan qui lui fournissent 14 % de ses eaux, sous le nom de Lantsang. Après un parcours de 1 600 km, il sert alors de frontière entre la Birmanie et le Laos.

A Sop Ruak - Chiang Saen, le Mékong se trouve à 360 m d'altitude et doit encore parcourir 2 400 km avant de se jeter dans la mer de Chine. Il franchit d'abord les chaînes du nord Laos où se succèdent des passes étroites, parsemées de rapides, et des petits bassins comme celui de Louang Prabang. A leur sortie, il se déporte, vers l'est, vers la Cordillère ou Monts Annamitiques qu'il longera ensuite jusqu'au Cambodge, le tout en bordant par sa rive droite le plateau thaïlandais de Korat. Si, en rive gauche, il reçoit les nombreux affluents drainant les flancs au vent des monts du Laos et de la cordillère, en rive droite, les apports sont faibles jusqu'au confluent avec la Nam Mune qui draine, avec son affluent la Nam Chi, la majeure partie du plateau thaïlandais.

Sur ce parcours, avec la plaine de Vientiane à 160 m d'altitude, la vallée prend quelque ampleur et le fleuve atteint un kilomètre de large. Très vite, dans la région de Paksane, la vallée se resserre et est bordée par un relief karstique. Après les rapides de Keng Kabao, elle reprend toute son extension et le Mékong entre dans la plaine de Savannakhet qui s'étend jusqu'à la Cordillère Annamitique, la plus vaste plaine du Laos, drainée par la Se Bang Hieng. Les rapides de Khenmarat passés, il reçoit en rive droite la Nam Mune, et, alors, se succèdent des petites plaines à Paksé et Champassak où le Mékong peut avoir deux km de large. Puis c'est Sithandone, "le pays des quatre mille îles" qui s'achève sur les chutes de Khône, avec un abrupt de plus d'une vingtaine de mètres.

Au Cambodge, en amont de Stung Treng, le Mékong reçoit en rive droite presque simultanément les Se Kong et Se San, gonflée de la Srepok : ces trois rivières drainent toute la partie méridionale de la Cordillère Annamitique et les hauts-plateaux du sud du Vietnam et nord-est cambodgien. C'est ensuite entre Stung Treng et Kratié, un bief plus élargi que coupent à Sambor les derniers rapides. A Kratié (646 000 km<sup>2</sup>), il lui reste quelques mètres pour parcourir plus de 500 km qui le séparent encore de son embouchure et, à Kompong Cham, 80 km en aval, l'onde de marée commence à se faire sentir aux basses eaux.

On débouche alors dans les grandes plaines du Cambodge occupant les deux tiers du pays, centrées sur la plaine des Quatre Bras autour de Phnom Penh (Mékong amont, exutoire du Tonle Sap du Grand Lac, Mékong aval et Bassac). Au nord-est, s'étend le bassin des Lacs ou du Grand Lac, bordé par la chaîne des Cardamomes, au sud, et par la falaise des Dangreks, au nord.

Enfin, le Mékong doublé du Bassac, traverse la plaine des Jones et porte au Vietnam le nom de Cuu Long (Fleuve aux neuf dragons). Le delta, qui couvre 9 600 km<sup>2</sup>, est composé de six bras principaux et ce sont plus de 500.10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> qui se déversent annuellement en cet endroit dans la mer de Chine.

## LA MOUSSON D'ASIE DU SUD-EST

Les sources du Mékong sont englobées par les sommets enneigés de l'Himalaya ce qui donne un régime nival au Haut-Mékong. Cependant, la plus grande partie du bassin, en aval, depuis les montagnes du Sichuan jusqu'au delta, est sous le régime de mousson de l'Asie du Sud-Est.

Les phénomènes moteurs de la mousson sont extérieurs à la Péninsule Indochinoise. En été, les basses pressions thermiques qui attirent l'alizé austral originaire des hautes pressions du continent australien, s'installent, en effet, loin au nord sur l'Asie Centrale et la Mongolie. L'alizé prend, en franchissant l'équateur, une direction sud-ouest-nord-est et s'humidifie en traversant la zone équatoriale; une masse d'air humide venant du sud-ouest envahit la région.

### - Saison sèche

En hiver, souffle sur cette région un vent sec et frais du nord ou du nord-est, opposé à la mousson d'été; il y a donc alternance des vents. Mais il est peut probable que la "mousson" du nord-est soit une vraie mousson, c'est-à-dire que ce soit le seul vent froid issu de l'anticyclone sibérien qui pénètre jusque dans ces régions. De février à mars-avril, lors de la "saison chaude" aucun souffle caractérisé ne se fait plus sentir, le temps est sec mais chaud; lors de la "saison fraîche", de novembre à février, le vent de nord-est est frais et non pas froid; il semble provenir de cellules anticycloniques mobiles situées sur la Chine du Sud, l'Indochine du Nord ou le Pacifique occidental: ces cellules sans doute renforcées par l'air sibérien sont des cellules subtropicales, et le vent qui souffle sur l'Asie du Sud-est est plutôt un *alizé*.

Les pénétrations méridionales d'air sibérien, de temps à autre, provoquent une cyclogénèse dans le golfe du Tonkin avec pluies frontales continues, souvent de type crachin, pouvant atteindre le sud de la péninsule.

L'influence, en hiver, de la *façade maritime orientale de l'Asie* est donc complexe et encore mal expliquée.

### - Saison des pluies

Les faits ne sont pas plus simples durant la saison des pluies, où à l'*irrégularité interannuelle de la mousson* s'ajoutent des éléments perturbateurs (Tableau 1).

Le premier élément est le relief avec l'effet classique de "barrière" ou "abri", effet d'autant plus efficace que le flux de mousson est plus épais et vigoureux. Dans les zones "sous le vent" de la mousson du sud-ouest



## UN REGIME DE "MOUSSON"

Le Mékong Inférieur, avec ses affluents, est donc sous l'influence de la "mousson d'Asie du sud-est"; il en subit toutes les fluctuations et perturbations (climatiques et orographiques) : le régime pluviométrique et, par suite, le régime hydrologique et hydrographique ont de très grandes variations annuelles et interannuelles (Tableaux 1 et 2). Les principaux facteurs conditionnels sont :

- à la base, le phénomène mousson, avec théoriquement une saison sèche et une saison des pluies

Tableau n° 1

**PLUVIOMETRIE MENSUELLE ET ANNUELLE**  
**MOYENNES ET EXTREMES**  
(mm)

Poste	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nov	Dece	Année
Lao Kay	64	99	153	250	471	491	574	810	565	288	177	105	2534
	15	38	57	117	223	222	305	345	242	118	60	25	1767
	0	1	8	27	75	44	132	140	97	9	1	2	1179
Luang Prabang	140	94	91	314	383	386	485	541	366	248	116	65	1879
	16	17	30	109	163	155	230	299	166	78	30	13	1306
	0	0	0	11	21	8	68	72	24	0	0	0	510
Vientiane	65	62	134	329	439	499	515	506	777	329	99	24	2138
	6	15	37	99	268	302	267	292	303	108	15	3	1715
	0	0	0	7	79	102	116	50	99	0	0	0	1373
Dà-Nang	219	74	34	70	116	177	252	293	1176	1256	620	450	2167
	102	31	12	18	47	42	99	117	447	530	221	209	1875
	49	1	1	1	0	3	9	11	156	67	106	40	1501
Paksé	6	86	43	188	363	421	736	832	752	230	38	14	2910
	1	12	12	83	230	314	505	450	404	103	17	4	2135
	0	0	0	34	111	82	308	243	151	11	0	0	1441
Nakhon-Ratchasina (Korat)	28	107	125	145	350	242	263	241	566	347	174	4	1401
	7	33	48	83	157	111	132	139	244	171	37	3	1162
	0	0	13	5	54	46	76	59	129	58	0	0	1006
Battambang	54	113	204	266	340	276	284	289	609	524	282	132	1702
	6	17	47	87	155	147	155	158	262	228	78	25	1365
	0	0	0	5	41	23	71	70	79	79	1	0	919
Kratié	74	76	113	302	509	465	760	617	587	387	331	163	2373
	9	13	23	108	242	242	343	256	346	175	75	26	1858
	0	0	0	4	76	93	67	84	99	54	0	0	1402
Phnom Penh	51	127	193	359	318	393	359	380	443	650	298	176	2310
	7	10	40	77	134	155	171	160	224	257	127	45	1407
	0	0	0	0	30	27	55	66	93	63	2	0	969
Ho Chi Minh	111	10	129	178	561	522	595	499	507	603	286	173	2718
	16	3	13	42	220	331	314	269	336	269	115	56	1984
	0	0	0	0	49	180	98	118	204	82	3	12	1552
Ha-Tien	138	97	421	345	504	415	613	549	521	432	370	261	2929
	12	14	50	136	231	240	311	274	254	240	129	47	1938
	0	0	0	0	46	50	84	40	33	26	0	0	1069



Tableau n° 2

**QUELQUES MODULES ET VALEURS EXTREMES OBSERVEES SUR LE BASSIN DU MEKONG**  
 (nn) : Millésime d'observation du débit extrême

	Sup km <sup>2</sup>	Qmin m <sup>3</sup> /s	Qma m <sup>3</sup> /s	Qmx m <sup>3</sup> /s
<b>MEKONG</b>				
Chiang Saen	198 000	548 (63)	2 750	23 500 (66)
Vientiane	299 000	701 (56)	4 500	26 000 (66)
Pakse	545 000	1 060 (32)	10 200	57 800 (78)
Kratié	646 000	1 250 (60)	14 100	67 000 (39)
<b>NAM OU</b>				
Muong Ngoy	16 500	39 (60)	714	3 700 (66)
<b>SE BANG HIENG</b>				
B. Keng Done	19 400	12 (60)	610	7 100 (64)
<b>NAM MUN</b>				
Ubol	104 000	3,2 (60)	663	6 970 (78)
<b>SE KONG</b>				
Ban Khmuon	29 600	77 (60)	1400	10 000 (61)
<b>SE SAN</b>				
Ban Komphun	48 200	106 (60)	1 550	12 600 (62)

**- La rive droite.**

Sur cette rive, deux entités présentent des caractères communs : zones déprimées "sous le vent" des reliefs, qui les bordent, et ayant un exutoire principal sur le Mékong ; ce sont le Plateau du nord-est thaïlandais ou plateau de Korat et au sud le Bassin cambodgien du Grand Lac

La répartition moyenne des pluies mensuelles dénote la prépondérance des pluies de convergence et entraîne l'existence de la période principale d'écoulement de septembre et octobre comme sur le plateau thaïlandais.

Le phénomène le plus remarquable est l'inondation des basses plaines cambodgiennes d'altitude inférieure à la cote NGK de 10 m. : Grand Lac, et Veal Pok et, en rive gauche, la région de Prey Veng. Le Grand Lac à l'étiage est à une cote voisine de 1 m, avec une profondeur maximale équivalente, et couvre une surface de 2 300 km<sup>2</sup>; à la cote 9 m, il couvre 15 000 km<sup>2</sup> et stocke 60 km<sup>3</sup> environ.

Ce phénomène, vaste problème de vases communicants, est régi par les variations des niveaux du Grand Lac et du Mékong, donc par l'amplitude de sa crue, ramenée à 8-9 m à Phnom Penh. En moyenne :

- annuellement les apports propres au bassin du Grand Lac sont de 30 km<sup>3</sup>, concentrés sur la période juillet-octobre.

- le Mékong est tributaire du Grand Lac de fin mai à fin septembre, d'abord directement par le Tonle Sap via Phnom Penh jusqu'à la mi-août avec un débit maximal voisin de 10 000 m<sup>3</sup>/s, puis, quand sont atteintes et dépassées les cotes 10m à Kompong Cham et 8 m à Phnom Penh, par des preks à travers le Bec de canard, langue de terre comprise entre le Mékong et le Tonle Sap. Les apports du Mékong au Grand Lac sont de l'ordre de 45 km<sup>3</sup>.

- le Grand Lac par le Tonle Sap est tributaire du Mékong - Bassac du début octobre à la mi-mai, avec un apport moyen de 8 000 m<sup>3</sup>/s d'octobre à décembre et un maximum de 10 000 m<sup>3</sup>/s, retardant d'autant la décrue sur le Delta. L'onde de marée se fait sentir dès mars à Phnom Penh.

Par le Tonle Sap transitent, au total, environ 115 km<sup>3</sup>.

#### - Le Delta.

Zone sans relief, inondée au rythme des cotes du Mékong à Phnom Penh, la mousson et les pluies de convergence y dispensent assez régulièrement une pluviométrie moyenne de 1900 mm.

## EVALUATION DES RESSOURCES.

Tout aménagement hydraulique, quelles que soient son importance et sa destination, est élaboré à partir d'éléments de natures diverses, parmi lesquels les éléments hydrométéorologiques figurent toujours et sont souvent même à la base des conditions qui rendent possible ou non la réalisation de cet aménagement. Ces éléments hydrométéorologiques ne sont généralement ni disponibles, ni sous la forme souhaitée; ils doivent donc être établis grâce à un traitement adéquat de l'information hydrométéorologique de base. Ce traitement d'information et la présentation des éléments hydrométéorologiques requis pour l'aménagement constituent la note hydrologique de l'aménagement concerné.

#### - Les Données.

Quel type d'information de base? Le tableau n°3 résume, pour les aménagements hydro-électriques avec ou sans accumulations et quelques aménagements connexes ou accessoires, la gamme des informations hydrométéorologiques nécessaires. On y trouve seize informations classées sous trois rubriques : eaux de surface, eaux souterraines et milieu physico-climatique du bassin versant. Cette liste d'informations n'est peut-être pas tout à fait complète, mais elle contient les éléments essentiels de tous ces projets d'hydraulique, au moins dans cette région.

En matière de provenance, on peut voir que la presque totalité des informations ont pour origine un réseau de mesures hydrométriques, piézométriques ou climatologiques. Aux stations ponctuelles de ces réseaux, sont effectuées diverses opérations : enregistrements et lectures, mesures et observations.

Ces opérations obéissent à des cadences dépendant de la variabilité des phénomènes à connaître. Les cadences retenues dans le tableau n°4 sont les plus usitées. Ces cadences ont été résumées un peu simplement sous trois vocables :

- *continue*, quand le phénomène doit être l'objet d'un contrôle ou d'observation permanente, réellement continue (enregistrement) ou selon une périodicité courte (plusieurs fois par jour);

Dans la dernière colonne du tableau n°4, sont portées quelques variables représentatives de chacune des informations sélectionnées. Ceci permet en un premier lieu de voir qu'une information est rarement une donnée simple mais qu'elle s'exprime de diverses manières soit par le truchement de variables aléatoires grandeurs physiques plus ou moins continues dans le temps, soit par le truchement de variables numériques caractérisant l'existence de l'information (occurrence, périodicité,...), soit encore par le biais de caractères numériques à peu près constants, grandeurs physiques d'état (morphométrie) ou pourcentage d'apparition (répartitions géographiques ...). La diversité des variables, inscrites ou implicitement contenues dans cette colonne, en elles-mêmes et par rapport à l'information qu'elle représentent, fournit une indication sommaire mais suffisante sur la complexité de leur élaboration. Or les éléments hydrométéorologiques d'aménagements sont calculés ou estimés à partir du traitement de ces diverses variables.

La méthodologie de gestion des réseaux de mesures permet de définir la nature du captage de l'information et la cadence de collecte.

L'ensemble des techniques qui permettent de déterminer les variables représentatives d'informations hydrométéorologiques constitue la méthodologie du dépouillement et de la critique des données brutes collectées et de l'élaboration des données de base - qui sont en fait tout ou partie des dites variables.

Ces dernières opérations sont facilitées par l'outil informatique qui permet en final la gestion des données de base dans des banques. Cette gestion ne doit pas se limiter aux seules données brutes ou élaborées (débits), mais aussi être étendue à l'historique de l'acquisition de ces données (localisation, appareillage, incidents,...) pour en faciliter la critique. Or les gestionnaires de réseaux sont les plus à même d'assurer la gestion et la critique des données types qu'ils collectent, ce qui induit une gestion de type *banques thématiques* (Hydrométrie, Climat,...) et exploitation directe sans interférence ou indirecte de leurs fichiers par les logiciels de traitements et les bases de données synthétiques; la diversité des traitements renforce la dualité gestion - exploitation.

#### - Les traitements.

Les traitements peuvent aller du plus simple au plus complexe; ils dépendent principalement :

- du type, de la taille de l'aménagement et de son influence sur le régime hydrologique;
- des situations relatives du site d'aménagement et des sources d'informations;
- les sources d'information étant localisées, des données disponibles en quantité et qualité suffisantes pour obtenir des évaluations avec une précision souhaitable.

Il est évident que l'on implante rarement un aménagement au lieu même d'une station hydrométrique du réseau de base, cas éminemment favorable. Dans la plupart des cas, il n'y a pas coïncidence : les évaluations sont faites à partir de données fournies par des stations situées ailleurs sur le même cours d'eau (corrélations, extension de station tertiaire,...) ou sur un cours d'eau voisin comparable (analogie). L'utilisation des bassins de comparaison permet seulement de remplacer l'information hydrologique sur le bassin quand elle manque, ou de l'améliorer quand elle est insuffisante.

Dans tous les cas, la précision des résultats de l'analyse hydrologique est d'autant moins bonne que l'information disponible est réduite et que les variables estimées concernent des périodes courtes (débits journalier, événement de récurrence rare,...). Le fait que l'intervalle de confiance d'une évaluation soit lié à la taille de l'échantillon, incite à disposer de séries chronologiques de données de base les plus longues possibles, soit de données observées soit de données étendues à l'aide d'une série encore plus longue, en général de précipitations connues sur des périodes plus étendues que les écoulements.

Dans ces diverses manipulations, les informations hydrométéorologiques présentées sous la forme de données de base peuvent être utilisées telles quelles ou à peu près, mais le plus souvent sont transformées par des traitements statistiques - au sens le plus large - et / ou des modèles depuis les plus simples au plus complexes, spécifiques dans ce cas à l'aménagement.

Ces traitements, techniques et procédures recouvrent donc tout le champ de l'hydrologie analytique et statistique et de l'hydraulique. Ils ne peuvent être tous explicités ici; pour les illustrer, deux exemples classiques ont été retenus et sont exposés en annexes :



Ces traitements, techniques et procédures recouvrent donc tout le champ de l'hydrologie analytique et statistique et de l'hydraulique. Ils ne peuvent être tous explicités ici; pour les illustrer, deux exemples classiques ont été retenus et sont exposés en annexes :

- en Annexe A, l'établissement de courbes de régularisation, combinant une simulation d'exploitation et un traitement statistique; ce type d'évaluation nécessite une longue série chronologique de débits mensuels, série observée ou étendue.

- en Annexe B, l'évaluation des crues extrêmes et de la crue de projet par la méthode du gradex, illustrée par un exercice de style sur un aménagement vietnamien où la non-disposition de longues séries de données pluviométriques à proximité de l'aménagement accroît l'incertitude de l'estimation.

En conclusion, le rappel de ces phrases d'un des maîtres de l'hydrologie française, phrases qui peuvent être étendues à toutes données de base, s'impose :

*"La série chronologique des débits observés pendant une durée suffisamment longue, en une ou plusieurs sections d'un cours d'eau, constitue l'information hydrologique de base concernant ce cours d'eau. La plupart des pays du monde ont établi sur leur réseau hydrographique des réseaux de mesure, constitués d'un ensemble de stations de jaugeage, pour recueillir cette information.*

*La formation d'un personnel compétent, l'entretien des réseaux, la constitution de banques de données ne sont cependant pas toujours gratuits et leur rentabilité n'est pas toujours évidente aux yeux d'administrations souvent soucieuses de rationalisation sous forme d'économies qui risquent d'affecter la quantité, la continuité et la qualité de l'information recueillie. On ne dira jamais assez la valeur de cette information, indispensable à tout projet d'aménagement et sans laquelle les développements les plus élaborés de l'hydrologie moderne ne seraient que bavardages." in "ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS - Hydrologie, 6 Les débits des cours d'eau (Réménieras G.)"*

#### Bibliographie

BRUZON (E.), CARTON (P.), ROMER (A.), "Le climat de l'Indochine et les Typhoons de la Mer de Chine", Gouvernement général de l'Indochine, Hanoi, 1940.

CARBONNEL (J.P.), GUISCAFRE (J.), "Grand Lac du Cambodge, Sédimentologie et Hydrologie, 1962-1963", Muséum d'Histoire Naturelle / Centre de Recherches Géodynamiques / ORSTOM, Paris, 1964.

Comité pour la coordination des Etudes sur le bassin inférieur du Mékong, "Mékong inférieur, Annales Hydrologiques - 1962 à 1966", Bangkok.

Interim committee for co-ordination of investigations of lower Mekong Basin, "Lower Mékong, Hydrologic yearbook -1987", Bangkok, 1989.

METEO FRANCE / Ministère de l'Environnement, "Les Données Pluviométriques Anciennes", Paris, 1991.

NIEUWOLT (S.), "The climates of continental Southeast Asia", in World Survey of Climatology, vol 9, Climates of Southern and Western Asia, pp 1-66, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1981.

"ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS - Asie, Cambodge, Hydrologie, Laos, Mékong, Thaïlande, Vietnam", Paris, 1968 (1ère édition) et 1988 (2ème édition).

Tableau n° 3

**QUELQUES AMENAGEMENTS des EAUX et les INFORMATIONS HYDROMETEOROLOGIQUE REQUISES**

		Eaux de surface									Ex. Sout.			Climat, Milieu			
Exemples d'Aménagements des Eaux		Niveau d'eau	Débit	Vitesse	Débit solide	Morphométrie	Chimie	Biologie	Température	Vague/Seiche	Nappes	Qualité	Humidité	Pluie	Evaporation	E.T.R./E.T.P.	Géomorphologie
Aménagements hydro-agricoles	Drainage Irrigation Contrôle de l'érosion	X X	X X X	X	X X X	X	X	X		X	X X	X X	X X X	X	X		X
Aménagements à buts multiples	Protection contre crues Accumulation-réservoirs	X X	X X	X	X X	X	X	X	X	X X	X			X X	X		X X
Aménagements hydrauliques industriels, urbains ...	Hydro-électricité Assainissement urbain Navigation Ponts ouvrages d'arts	X X X X	X X X X	X	X X X	X	X	X	X	X				X X X	X X		X X X

Tableau n° 4

## SCHEMA d'OBTENTION des INFORMATIONS HYDROMETEOROLOGIQUES

Origine des informations	Cadence de collecte	Nature des informations	Variables représentative des informations
<u>Stations de réseau hydrométrique</u> - Enregistrements, lectures - " " - Jaugeages - " " - Prélèvements - " " - " " - Observations - " "	Continue " " Périodique " " " " " " " " Episodique " "	<u>de cours d'eau</u> Niveau Débit Vitesse Débit solide Comp. chimique Comp. biologique Comp. physique Seiches Morphométrie	Hauteur limnimétrique instantanée, moyenne journalière Débit instantané, journalier, mensuel, annuel Vitesse ponctuelle, moyenne, superficielle Concentration, quantité transportée en suspension, par charriage pH, potentiel redox, teneurs en cations, dureté ... D.B.O., D.C.O. ... Température ponctuelle, maximale, minimale Amplitude, périodicité .... Section, profil, rugosité, pentes, nature du fond ...
<u>Stations de réseau piézométriques</u> - Enregistrements, lectures - Prélèvements - Mesures - " "	Continue Périodique Périod/Episod " "	<u>de nappe aquifère</u> Niveau Qualité Débit sources Débit aquifère profond	Hauteur piézométrique, amplitude Identique à composition chimique, bio et physique de cours d'eau Débit instantané, moyen, extrême ... Identique à débit des sources
<u>Stations de réseau climatologique</u> - Enregistrements, relevés - " " - Mesures / Calculs	Continue " " Contin/Episod.	<u>de climat</u> Pluie Evaporation eau E.T.P., E.T.R.	Hauteur à divers pas de temps, journalière, mensuelle, annuelle Hauteur journalière, mensuelle, annuelle Valeurs pour divers pas de temps
<u>Eau dans le sol</u> - Mesures	Périodique	Humidité du sol	Valeurs pour divers pas de temps
<u>Géographie physique</u> - Observations	Episodique	<u>de bassin versant</u> Complexe physique	Répartition géologique, pédologique, caractères hydrodynamiques des terrains, géomorphologie (forme du chevelu, densité de drainage), couvert végétal, Topographie (Pentes) ....



## COURBES DE REGULARISATION

Pour évaluer rapidement et d'un point de vue uniquement hydrologique les possibilités de régularisation des apports d'une rivière, on établit les "courbes de régularisation" à un site : ces courbes donnent la capacité utile VU du réservoir qui serait nécessaire pour assurer la fourniture d'un débit permanent QR (débit régularisé) avec un taux de défaillance fixé.

La méthode consiste à supposer au site où l'on connaît les apports (Chronique des débits mensuels sur une longue période, par exemple) l'existence d'une retenue fictive dont la capacité n'est pas limitée a priori.

En considérant cette retenue comme déjà pleine au début de la période pour lequel les apports sont connus, on calcule pour différentes valeurs de QR, les volumes maximaux qu'il faudrait prélever chaque année dans les réservoirs au cours de la période de régularisation (fig.1)

Les calculs dans le cas de l'OUEME à KETOU ont été effectués sur la période 1952-1989 en prenant pour QR des valeurs représentant successivement 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30 et 10 % du module. Ensuite l'analyse statistique des volumes maximaux prélevés (Déficits) chaque année fournit pour différentes probabilités de satisfaction les volumes utiles du réservoir nécessaire (tab 1).

On peut ainsi construire pour différents taux de défaillance acceptés, les courbes adimensionnelles donnant le débit régularisable QR rapporté au module QM en fonction du volume utile VU rapporté à l'apport moyen annuel du site (fig.2).

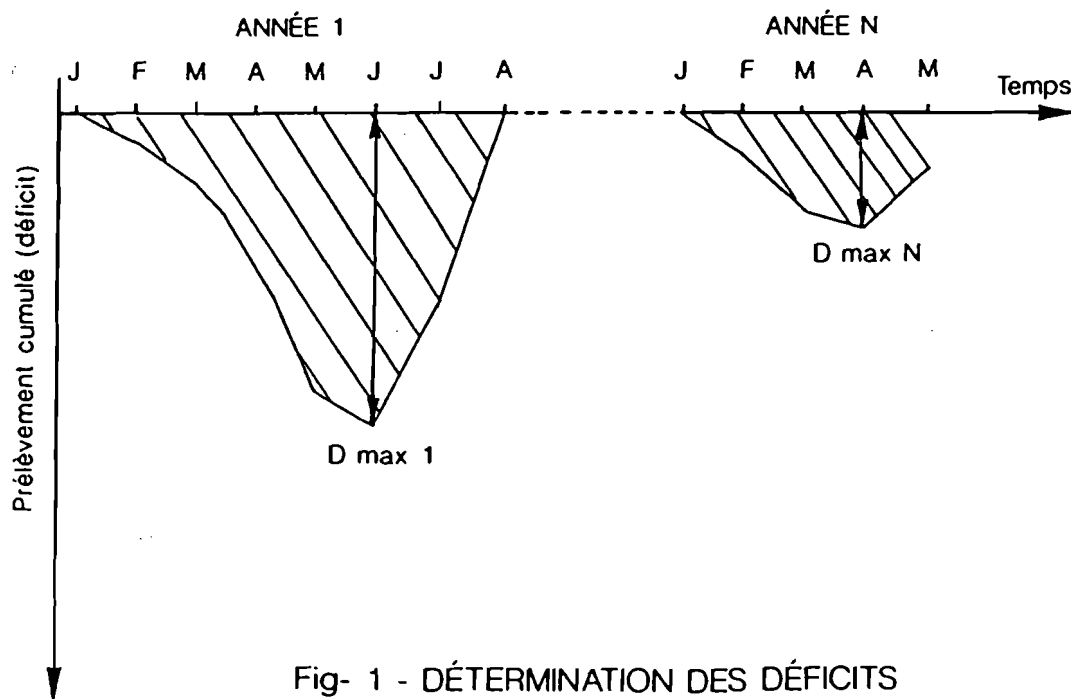


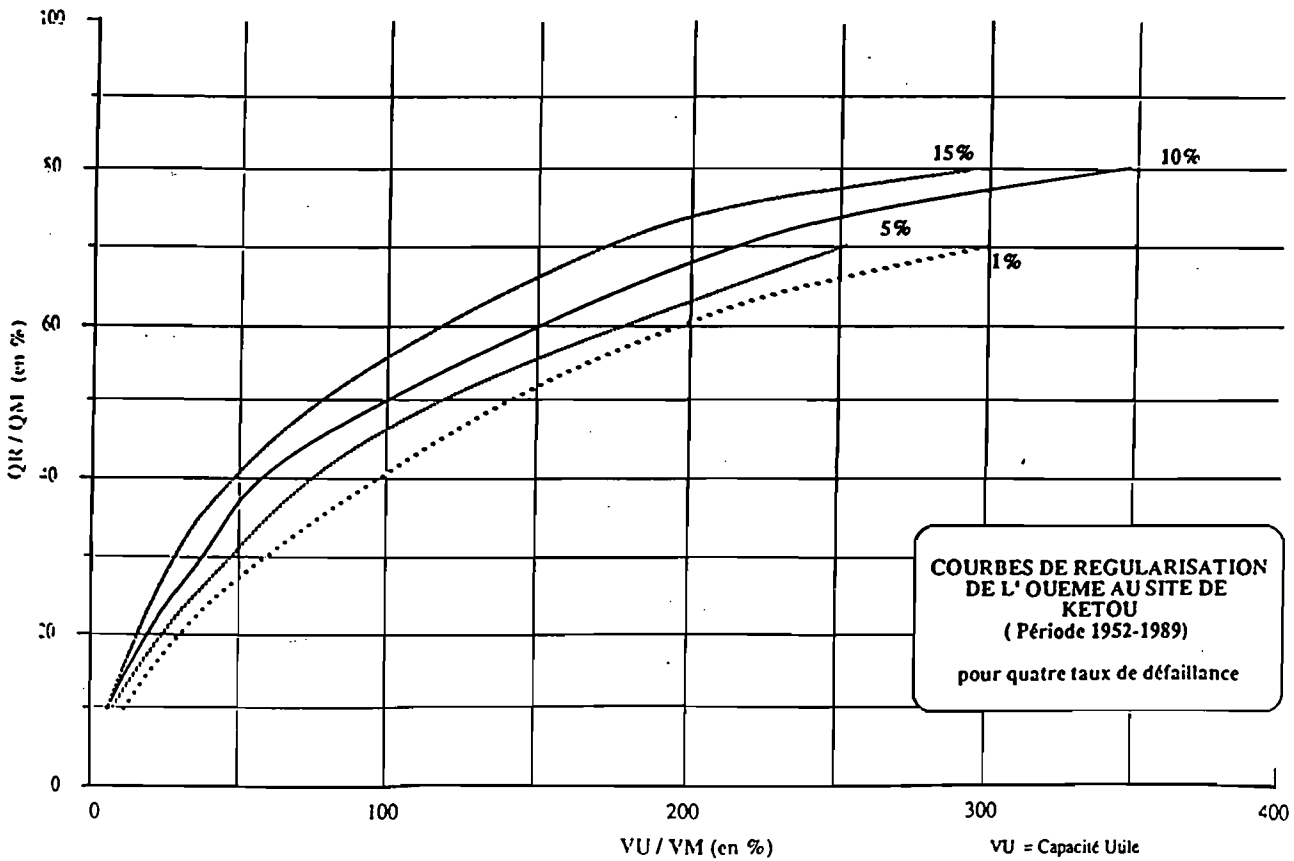
Fig- 1 - DÉTERMINATION DES DÉFICITS

(simulation sur N années)

**COURBES DE REGULARISATION DE L' OUEME AU SITE DE KETOU**  
**CAPACITE UTILE Vu NECESSAIRE POUR REGULARISER UN DEBIT QR**  
**AVEC UN TAUX DE DEFAILLANCE DONNE**

Taux de défaillance	Qr (m3/s)	144	128	112	96,0	80,0	64,0	48,0	32,0	16,0
	Qr/Qm (t)	90	80	70	60	50	40	30	20	10
1 t	Vu (hm3)	-	-	15000	10050	7000	4900	3000	1500	590
	Vu/Vm (t)	-	-	297	199	139	97,0	59,4	29,7	11,7
5 t	Vu (hm3)	-	-	12700	9000	5850	3750	2400	1200	400
	Vu/Vm (t)	-	-	252	178	116	74,3	47,5	23,8	7,9
10 t	Vu (hm3)	-	17500	10800	7500	5000	2800	1950	990	320
	Vu/Vm (t)	-	347	214	149	99,0	55,5	38,6	19,6	6,3
15 t	Vu (hm3)	-	14800	8600	5130	3900	2400	1340	840	304
	Vu/Vm (t)	-	293	170	119	77,2	47,5	26,5	16,6	6,0

Qm : Module interannuel = 160 m3/s  
 Vm : Apports moyens interannuels = 5049 hm3



## EVALUATION DES CRUES EXTREMES ET DE LA CRUE DE PROJET PAR LA METHODE DU GRADEX

### INVENTAIRE SOMMAIRE DES METHODES DE CALCUL

Le calcul des risques de crues extrêmes a été et reste un problème important pour l'aménagement d'un pays, compte tenu des concentrations urbaines et industrielles et du développement des voies de circulation dans la plupart des vallées. Il serait d'ailleurs logique de réévaluer, dans le temps, les choix des risques pour tenir compte d'une croissance importante de l'habitat et de l'industrie dans une région.

Mais la notion même de risque ne semble guère se prêter à une définition objective, car les hydrologues praticiens chargés d'études de crues de projet pour un maître d'oeuvre, associent souvent de façon assez floue le "danger", pour la population et les industries situées à l'aval, de la rupture d'un barrage en cas de submersion par une crue, et, la "probabilité" de son apparition.

Les approches utilisées dans les différents pays du monde pour évaluer la "crue de projet" en sont une illustration frappante. Elles peuvent se répartir en deux principaux types englobant chacun différentes méthodes de calcul.

La première approche consiste à maximaliser des paramètres hydrométéorologiques sur le bassin versant pour se garantir contre les pires excès de la nature :

- on multiplie le plus fort débit historique observé sur le site par un coefficient de sécurité (2, 3, 4.. où s'arrêter?);
- on détermine les courbes-enveloppes de débits de crue records enregistrés dans le monde en fonction de la surface du bassin versant (même en régionalisant, il s'agit d'un mélange d'événements dont les probabilités d'occurrence sont différentes, et par ailleurs, les records "tombent" chaque année);
- la crue maximale "probable" est calculée d'après les précipitations maximales "probables" sur le bassin, que l'on étale d'amont en aval en fonction de transfert en faisant une hypothèse sur la rétention (référence inadaptée à la notion de probabilité, calcul à l'échelle macrospatiale qui négligent les particularités locales de petits bassins, ce qui peut conduire pour ceux-ci à sous-estimer l'occurrence des crues catastrophiques).

La seconde approche consiste à attribuer et calculer une probabilité aux crues extrêmes :

- ajustement de fonctions de répartition (lois de probabilité) de type Gumbel, Fréchet, Log Pearson 3,..., éventuellement produit des lois de probabilité, aux données historiques (quelques dizaines d'années) de débits maximaux annuels de crue qui sont extrapolés aux faibles probabilités de dépassement  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ...(souvent très divergentes);
- la méthode du renouvellement qui constitue une extension plus perfectionnée et plus robuste de la méthode précédente utilise toute l'information historique connue sur les débits de crue, ainsi que tous les débits de crue de chaque année d'observation supérieurs à un seuil ( utilisable pour les grands bassins versants et une durée de retour inférieure à 500 ans);
- la méthode du gradex qui déduit la fréquence des débits extrêmes de la fréquence des pluies extrêmes en s'appuyant sur quelques hypothèses physiques simples et s'applique à des bassins versants de petite et moyenne importance (quelques dizaines à quelques milliers de  $\text{km}^2$ ).

### APPLICATION DE LA METHODE DU GRADEX.

#### 1. Rappel de la méthode

Mise au point par la Division Technique Générale d'EDF, on trouvera dans la communication citée en référence une description détaillée de cette méthode dont on rappellera ci-après les trois hypothèses de base :



*- Première hypothèse*

La fréquence  $F(P)$  de la précipitation en  $H$  heures en un lieu et pendant une saison donnée est à décroissance exponentielle simple, lorsque  $P$  est grand, suivant la relation :

$$1 - F(P) = e^{-((P - p) / a)}$$

$p$  étant une constante et  $a$  le gradex (gradient des valeurs extrêmes). C'est un paramètre climatologique qui peut être calculé à partir de quelques dizaines d'années d'observations au moins journalières.

*- Deuxième hypothèse*

Quand on approche de la saturation du bassin versant (au-delà de la crue décennale par exemple), tout accroissement  $dP$  de la précipitation produit un accroissement  $dH$  de la lame écoulée, donc  $dQ$  de débit, qui tend à devenir égal à  $dP$ . La rétention moyenne atteint alors la limite pratique et les deux distributions des valeurs extrêmes de la pluie  $F(P)$  et du volume de crue  $G(Q)$  sont asymptotiquement parallèles en graphique de Gumbel :

$$1 - G(Q) = e^{-((Q - q) / a)}$$

*- Troisième hypothèse*

Pour passer de la probabilité du débit moyen  $Q_m$  en  $H$  heures, au débit de pointe de crue  $Q_{max}$  on admet que le rapport moyen  $r = Q_{max} / Q_m$  est indépendant du débit (ceci a été vérifié pour de nombreux cours d'eau).

On en déduit alors la distribution des valeurs extrêmes du débit de pointe de celle des débits moyens en  $H$  heures par une simple affinité de valeur  $r$ .

L'intérêt de la méthode du gradex est de prendre moins de risques pour estimer les crues de fréquences rares en s'appuyant sur l'information pluviométrique généralement plus abondante que l'information hydrométrique.

Encore faut-il que cette information pluviométrique soit suffisante dans l'espace et dans le temps pour assurer la détermination correcte de la distribution statistique des précipitations et permettre d'appréhender la variation spatiale du gradex des pluies. Cela nécessite des séries pluviométriques longues, complètes, homogènes et de bonne qualité sur le plus grand nombre de stations possible.

**2. Cas de l'aménagement Hydro-électrique de VINH-SON (VIET-NAM)**

A titre d'exemple, le Ministère de l'Energie avait demandé à E.D.F. d'appliquer la méthode du Gradex au projet d'aménagement de VINH-SON, sur deux sites adjacents contrôlant chacun environ 100 km<sup>2</sup>.

*- Les données*

Les données de pluviométrie journalière disponibles comprenaient :

- une assez longue série pour QUY-NHON (38 années), situé en bordure de mer à une centaine de kilomètre au sud-est des sites;
- plus d'une dizaine d'années, pour quatre stations plus proches ;
- moins de dix ans, pour quatre autre stations situées sur le bassin du SONG KON dont celle de VINH-SON.

Une différence nette se dessine entre les 3 stations du nord-est très exposées aux perturbations venant du nord avec des précipitations maximales supérieures à 300 mm et les stations situées sur le bassin du SONG KON où l'on relève, sur la courte période commune, des écarts relativement faibles entre les totaux pluviométriques annuels ainsi qu'entre les maximaux journaliers temporellement indépendants (tout au moins jusqu'à la cote 1000 m.) avec ceux de la station de QUY-NHON.

Les données hydrométriques étaient limitées aux débits horaires relatifs aux plus fortes crues observées aux quatre stations équipant le bassin du SONG KON, avec 9 années pour la station de CAY-MUONG (1610 km<sup>2</sup>).

- *Gradex des pluies*

Le temps de concentration du bassin, certainement inférieur à 24 heures, n'étant pas connu, on est contraint de travailler avec des données journalières, en utilisant celles de QUY-NHON.

Après vérification du caractère asymptotiquement exponentiel de la distribution des valeurs pluviométriques extrêmes, les gradex mensuels et annuel des précipitations journalières ont été calculés (Tableau 1).

Tableau 1 - GRADEX MENSUELS et ANNUEL A QUY-NHON (en mm/jour)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An.
9,2	11,2	7,0	11,3	15,4	18,0	14,3	18,1	26,6	50,3	62,5	25,6	51,1

A partir des variations du gradex au cours de l'année, un regroupement de plusieurs mois successifs en 3 saisons a été effectué (Tableau 2).

Tableau 2 - GRADEX MENSUELS A QUY-NHON (en mm/jour)

SAISON	GRADEX
Janvier à Avril	16,6
Mai à Août	20,2
Septembre à Décembre	53,3

Le plus fort gradex saisonnier obtenu pour la période de septembre à décembre, où se produisent les plus fortes précipitations annuelles, est retenu pour l'estimation de la crue de projet (Figure 1).

- *Gradex de la pluie moyenne à VINH-SON*

Le transfert des résultats ponctuels de QUY-NHON à la pluie moyenne sur les bassins à VINH-SON s'est effectué par comparaison avec les gradex annuels des stations voisines, établis à partir de distributions peu significatives car non homogènes et de trop courtes durées (10 ans environ), mais donnant néanmoins une tendance des variations spatiales de ce paramètre (Tableau 3).

Tableau 3 - GRADEX DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES

STATION	NOMBRE D'ANNEES	GRADEX(en mm/jour)
AN-HOA	11	62,6
CAY-MUONG	20	45,3
GIA-VUC	11	126
HOAI-AN	11	45,1
QUY-NHON	38	51,1

Le gradex à GIA-VUC est dû en grande partie au poids de la valeur exceptionnelle (732 mm) du 3 décembre 1986 comparée aux relevés du même jour aux stations voisines (221,5 mm à VINH-SON et 154,5 à AN-HOA).

Il a été admis une augmentation du gradex entre QUY-NHON et VINH-SON, et , après un abattement l'ordre de 0,8 à 0,9, la valeur retenue pour la pluie moyenne sur les bassins est :  $a = 60\text{mm/jour}$ .

- *Distribution des débits.*

Le gradex des pluie journalières étant exprimé en mm/jour, le gradex des débits journaliers correspondant, en  $\text{m}^3/\text{s}$ , pour un bassin versant de  $S \text{ km}^2$  est :

$$g = a S / 86,4$$

Le rapport  $r = Q_{mx} / Q_{mj}$  a été estimé à partir des quelques hydrogrammes de crues observées sur les deux sites ayant des valeurs comprise entre 1,7 et 2; il a été adopté  $r = 2$ .

Le débit moyen décennal a été estimé à partir du débit spécifique décennal A du SONG KON à CAY-MUONG (1610 km<sup>2</sup>) par transfert à l'amont par la relation :

$$Q = A S^n$$

en adoptant  $n = 0,75$  valeur moyenne pour les crues décennales, nous obtenons pour le DAK PHAN au site A (97 km<sup>2</sup>):

$$Q_{mj} = 405 \text{ m}^3/\text{s} \text{ et } Q_{mx} = 809 \text{ m}^3/\text{s}$$

valeurs comparables à celles obtenues pour la formule de SOKOLOVSKI (818 m<sup>3</sup>/s) et par la méthode M-F (805 m<sup>3</sup>/s) utilisée par le Ministère de l'Energie.

Les résultats de l'extrapolation selon le gradex à partir du débit moyen décennal jusqu'à la probabilité décamillénale, sont donnés au tableau 4.

Tableau 4 - DEBITS MAXIMAUX ANNUELS DU DAK PHAN AU SITE A

Probabilité	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999	0,9999
Réurrence	10	20	50	100	1 000	10 000
Q <sub>mj</sub> (m <sup>3</sup> /s)	405	453	516	563	719	874
Q <sub>mx</sub> (m <sup>3</sup> /s)	810	906	1030	1130	1440	1750
q <sub>smx</sub> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	8,35	9,34	10,6	11,6	15,1	18,0

La valeur décamillénale - 1750 m<sup>3</sup>/s - est proposée comme crue de projet

L'insuffisance de l'information disponible induit une forte incertitude sur l'estimation du gradex des pluies et incite à examiner ce que l'on obtiendrait en majorant ce gradex (Tableau 5).

Tableau 5 - INCIDENCE DE LA VARIATION DU GRADEX

GRADEX DES PLUIES (mm)	DEBIT MILLENAL (m <sup>3</sup> /s)	DEBIT DECAMILLENAL (m <sup>3</sup> /s)
60	1440	1750
70	1540	1900
80	1650	2060
90	1750	2210
100	1860	2370
110	1960	2530

On voit que le résultat de la méthode du gradex pour ce site est assez nettement inférieur à la valeur retenue par le Ministère de l'Energie - 1910 m<sup>3</sup>/ - qui est le débit millénal obtenu par la formule de SOKOLOWSKI et équivaldrait à un gradex de 105 mm/j., valeur équivalente après abattement au gradex à GIA-VUC.

Pour comparer les résultats obtenus à ceux d'autres rivières soumises à des conditions climatiques similaires, le coefficient de FRANCOU-RODIER (méthode de courbes enveloppes) a été calculé avec la formule :



$$K = 10(1 - (6 - \log Q) / (8 - \log S))$$

L'on obtient pour le DAK PHAN au site A (97 km<sup>2</sup>) :

- avec Q<sub>mx</sub> = 1750 m<sup>3</sup>/s, K = 5,41

- avec Q<sub>mx</sub> = 1910 m<sup>3</sup>/s, K = 5,48

Ces valeurs sont fortes mais tout à fait en accord avec les estimations des auteurs de la formule qui indiquent pour ces régions montagneuses et bien arrosées du VIET-NAM, un coefficient K compris entre 5,4 et 5,5. A titre de comparaison sont reportées, dans le tableau 6, les valeurs de ce coefficient pour quelques crues de projet ou observées sur des bassins du VIET-NAM.

Tableau 6 - COEFFICIENT K DE FRANCOU-RODIER  
(Crues de projet ou observées sur des bassins au VIET-NAM)

SITE OU STATION	SUP. B.V. (km <sup>2</sup> )	DATE (m <sup>3</sup> /s)	DEBIT	K
Danhim à Dram	770	1932	3500	5,20
Song Kone à Van Phong	1610	projet	4130	4,56
Song Ba à An Klu	1340	projet	4300	5,14
Song Kone à Dinh Binh	1100	projet	5120	5,38
Son Dong Sim à Dong Sim	35	projet	800	5,20
Song An Truong à Nui Mot	76	projet	900	5,02

### Bibliographie

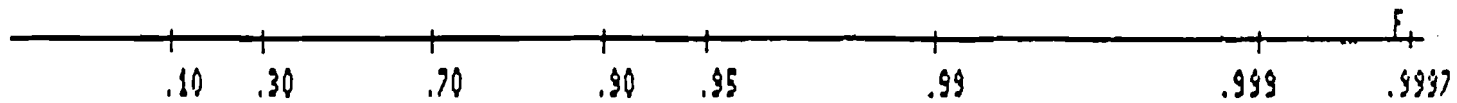
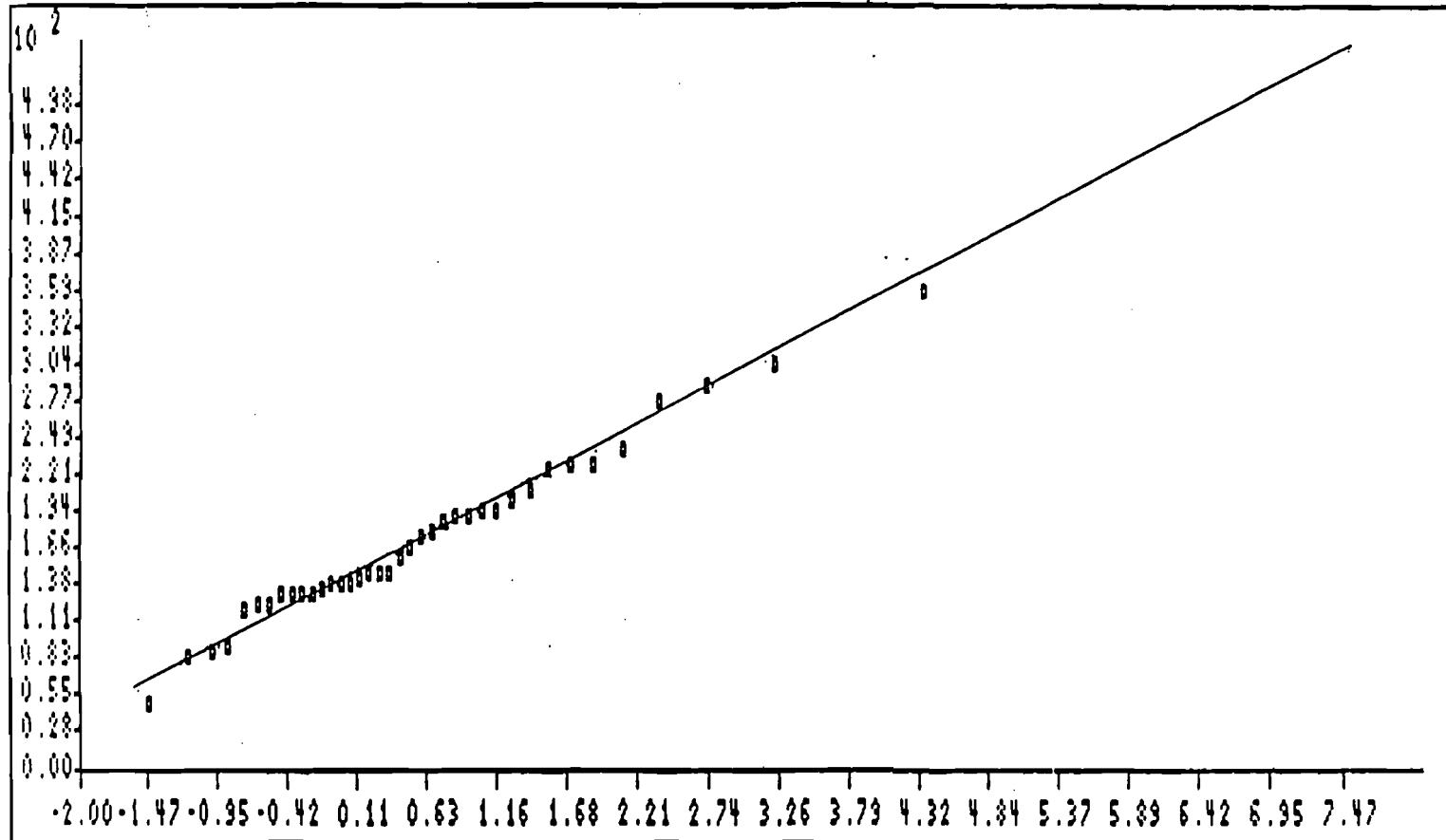
Commission Internationale des Grands Barrage, "Sélection de la crue de Projet, Méthodes actuelles", Bulletin 82 - Paris, 1992

DUBAND (D.), MICHEL (C.), GARROS (H.), ASTIER (J.), "Evaluation des Crues extrêmes et de la crue de projet par la méthode du Gradex", CIGB, 16<sup>e</sup> Congrès, Vol. IV, pp1009-1047, Q.63, R.60, San Francisco, 1988.

FRANCOU (J.), RODIER (J.A.), "Essai de classification des crues maximales observées dans le monde", Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, Vol. IV, n°3, Paris, 1967.

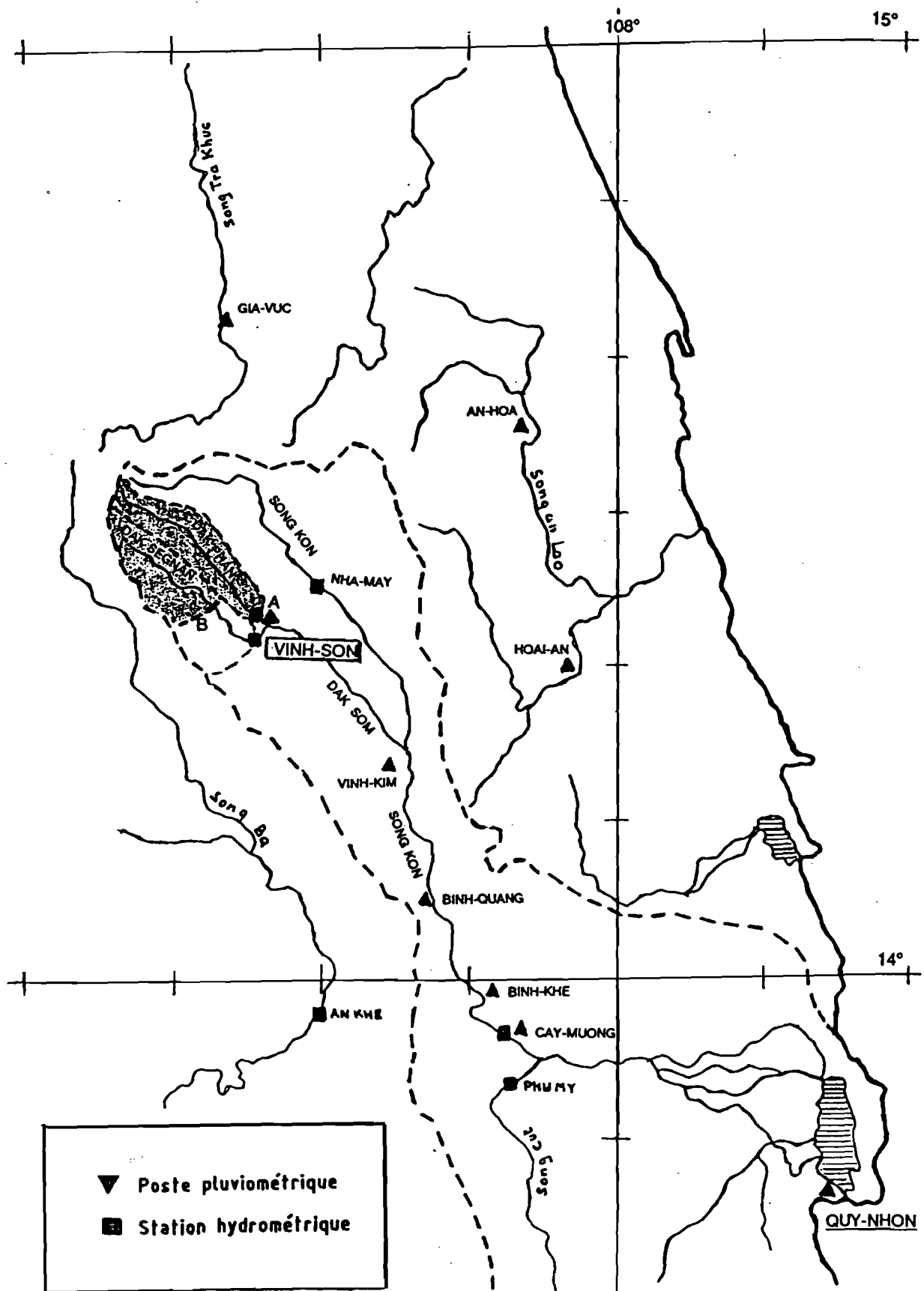
MIQUEL (J.), "Guide pratique d'estimation des probabilités des crues", Collection de la Direction

QUY-NHON PJ max. ann. Septembre a Decembre



Distribution observée et ajustement d'une loi de GUMBEL

Figure 1



AMENAGEMENT HYDRO-ELECTRIQUE DE VINH-SON