

HYDROLOGIE DE SURFACE

Guide Complet des Concepts & Méthodes

Cycle de l'eau · Bassins versants · Précipitations · Crues · Statistiques · Apports annuels

Basé sur le Cours d'Hydrologie (MR S. NDAO) · Manuel FAO Crues & Apports · Analyse Fréquentielle (2iE)

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction à l'Hydrologie de Surface
2. Le Cycle de l'Eau
3. Le Bassin Versant — Définition & Caractéristiques Morphométriques
4. Relief, Pentes & Hypsométrie
5. Réseau Hydrographique
6. Bilan Hydrologique
7. Précipitations & Pluviométrie
8. Infiltrabilité, Ruissellement & Écoulement
9. Crues — Concepts, Hydrogramme & Méthodes de Calcul
10. Méthode ORSTOM (Rodier) pour la Crue Décennale
11. Méthode CIEH pour la Crue Décennale
12. Apports Annuels & Écoulement Annuel
13. Statistique Hydrologique — Lois de Distribution
14. Analyse Fréquentielle : Loi de Gauss & Loi de Gumbel
15. Hydrométrie — Mesure des Débits
16. Synthèse des Formules Clés

CHAPITRE 1 Introduction à l'Hydrologie de Surface

► Qu'est-ce que l'Hydrologie ?

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. Elle regroupe plusieurs disciplines complémentaires :

Climatologie	Partie aérienne du cycle : précipitations, évaporation, retour à l'atmosphère.
Hydrologie de surface	Écoulements à la surface des continents — c'est notre domaine principal.
Hydrodynamique des milieux non saturés	Échanges entre eaux de surface et eaux souterraines (infiltration).
Hydrodynamique souterraine	Écoulements en milieux saturés (nappes phréatiques).

► Deux missions fondamentales

Prévision

Associer à une date future une certaine grandeur hydrologique : estimer le débit qui coulera demain, pendant la saison des pluies, etc. On répond à la question : QUAND aura-t-on X ?

Prédétermination

Associer à une grandeur hydrologique une certaine probabilité (ou période de retour). On répond à la question : Quelle est la probabilité d'avoir un débit $\geq X$? Essentiel pour dimensionner les ouvrages.

► Sciences mobilisées et leurs rôles

Météorologie & Climatologie	Étude des pluies et du retour à l'atmosphère.
Géologie, Géographie & Pédologie	Analyse du comportement hydrologique du bassin (perméabilité, sol).
Hydraulique	Mesure et étude des écoulements à surface libre.
Statistique	Traitement des données, ajustement à des lois de distribution, simulations.
Calcul numérique	Propagation de crue, modélisations et optimisations.
Informatique	Calculs numériques, stockage et traitement de données hydrologiques.

► Domaines d'application

L'hydrologie de surface répond à des besoins concrets et variés :

- Agriculture : irrigation, drainage des terres.
- Eau potable et eau industrielle : étude des ressources en eau.
- Lutte contre la pollution : étude des débits d'étiage qui évacuent les effluents.
- Énergie hydraulique : dimensionnement de barrages et turbines.
- Transport solide : étude de l'érosion et des dépôts sédimentaires.
- Navigation fluviale : niveaux d'eau, profondeurs navigables.
- Sécurité des biens et des personnes : protection contre les crues (événements extrêmes).
- Loisirs : gestion des plans d'eau, retenues.

CHAPITRE 2 Le Cycle de l'Eau

Le cycle hydrologique est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau — dans l'atmosphère, à la surface du sol, et dans le sous-sol. Il est sans début ni fin, mais ses étapes sont bien identifiées.

► États et situations de l'eau

Vapeur / Nuages	Atmosphère (humidité, évaporation, évapotranspiration)
Liquide	Océans, mers, lacs, cours d'eau, eaux souterraines
Solide	Glaciers, manteaux neigeux, calottes polaires

► Les grandes étapes du cycle

Évaporation & Évapotranspiration

L'eau liquide (océans, lacs, sols) et l'eau des plantes se transforment en vapeur sous l'effet de l'énergie solaire. La vapeur monte dans l'atmosphère. C'est le moteur du cycle.

Condensation & Précipitations

La vapeur d'eau monte, se refroidit et se condense en gouttelettes formant les nuages. Quand les gouttelettes sont suffisamment lourdes, elles tombent sous forme de pluie, neige ou grêle.

Interception par la végétation

Une partie de la pluie est captée par les feuilles et les branches avant d'atteindre le sol. Elle s'évapore directement. La végétation dense peut intercepter jusqu'à 30% des précipitations.

Ruissellement superficiel

La pluie qui atteint le sol et ne s'infiltre pas s'écoule en surface vers les cours d'eau, les lacs et finalement les océans. C'est la composante 'rapide' du cycle.

Infiltration & Percolation

Une fraction de la pluie s'infiltre dans le sol, alimente l'humidité du sol (zone non saturée) puis percole vers la nappe phréatique (zone saturée). Cette composante est 'lente' et soutient les étiages.

Écoulement souterrain

L'eau stockée dans les nappes phréatiques circule lentement vers les cours d'eau et la mer. Elle peut ressortir en surface sous forme de sources.

► Volumes indicatifs à l'échelle mondiale

Mers et océans	2 500 m (épaisseur équivalente) — 97,2 % des réserves totales
Glaciers	50 à 100 m — stock d'eau douce solide immobilisé
Eaux continentales	350 à 700 mm — dont eaux souterraines (300-600 mm) + cours d'eau (infime)
Eaux atmosphériques	20 à 30 mm — très faible mais renouvelé très rapidement
Eau douce totale	~36 millions de km ³ = seulement 2,8 % des réserves totales

💡 *Ce qui circule dans les cours d'eau ne représente qu'une fraction infime du volume d'eau total de la planète. L'essentiel est stocké dans les océans (salée) et les glaciers (eau douce non disponible directement).*

CHAPITRE 3 Le Bassin Versant — Définition & Morphométrie

Bassin versant (définition générale)

Surface drainée par un cours d'eau et tous ses affluents en amont d'une section de contrôle appelée exutoire. Toute eau tombée à l'intérieur de cette surface doit théoriquement traverser l'exutoire pour poursuivre son trajet vers l'aval.

► Types de bassins versants

Bassin versant topographique

Délimité uniquement par les lignes de crêtes et de plus grande pente sur une carte topographique. Valable quand le sous-sol est imperméable : l'eau ne peut circuler que selon la topographie.

Bassin versant hydrogéologique

Quand le sous-sol est perméable, des échanges souterrains existent entre bassins voisins. Les limites hydrogéologiques peuvent différer des limites topographiques. Cette distinction est surtout importante pour les petits bassins.

Exutoire

Point de sortie du bassin versant où sont mesurées les eaux qui le drainent. C'est le point de référence pour tous les calculs de débit et de volume écoulé.

► Configurations géographiques

Bassins versants en série

Un bassin amont (BV2) est drainé entièrement dans un bassin aval (BV1) avant d'atteindre l'exutoire commun. L'eau de BV2 transite obligatoirement par BV1.

Bassins versants en parallèle

Deux bassins (BV1 et BV2) ont un exutoire commun mais leurs eaux y arrivent indépendamment, sans l'un traverser l'autre. Les hydrogrammes se superposent à l'exutoire.

► Caractéristiques morphométriques essentielles

Surface A (ou S) $A \text{ en km}^2$

Première et plus importante caractéristique. Mesurée par planimétrie sur carte topographique après tracé des limites du bassin. Conditionne directement le volume d'eau potentiellement disponible : plus le bassin est grand, plus les débits peuvent être importants.

Périmètre P $P \text{ en km} - \text{curvimétré}$

Longueur du contour du bassin. Mesuré avec un curvimètre en schématisant les limites (supprimer les sinuosités mineures). Utilisé surtout pour calculer K_c et le rectangle équivalent. Dépend de l'échelle de la carte.

Indice de compacité de Gravelius (K_c) $K_c = 0,28 \times P / \sqrt{A}$

Rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle de même surface. $K_c = 1 \rightarrow$ bassin circulaire (réaction rapide, crues fortes). Plus K_c est grand (bassin allongé), plus les crues sont amorties dans le temps. C'est l'indice de forme le plus utilisé en pratique.

Indice de compacité de Horton (K_H) $K_H = S / L^2$

Rapport de la largeur moyenne du bassin à la longueur du cours d'eau principal. Complémentaire à K_c . Un bassin ramassé (forme arrondie) a un K_H élevé, réagit vite aux pluies.

Rectangle équivalent $L = (P + \sqrt{P^2 - 16S}) / 4 ; l = S / L$

Rectangle ayant même surface, même périmètre que le bassin. La longueur L (grand côté) correspond à la direction du plus long écoulement. Permet de projeter la courbe hypsométrique et de calculer les indices de pente. Introduit par Roche (1963).

Allongement de Caquot (a)

$$a = L / \sqrt{S}$$

Rapport du plus long parcours au côté du carré équivalent. Mesure à quel point le bassin est 'allongé' par rapport à un carré parfait. Un bassin très allongé (a grand) a un temps de concentration plus long.

💡 Pour vérifier la qualité du périmètre mesuré : la longueur L du rectangle équivalent ne doit pas être sensiblement supérieure à la longueur du plus long cours d'eau (thalweg principal).

CHAPITRE 4 Relief, Pentes & Hypsométrie

► Courbe hypsométrique

Courbe hypsométrique

Graphique donnant, pour chaque altitude h, la surface (en km² ou en %) du bassin versant située au-dessus de cette altitude. Établie par planimétrage à chaque courbe de niveau sur la carte topographique. Résume toute la distribution des altitudes du bassin.

Dénivelée D

$$D = H_{5\%} - H_{95\%}$$

Différence d'altitude entre le niveau H_{5%} (altitude dépassée par 5% de la surface) et le niveau H_{95%} (altitude dépassée par 95% de la surface). Mesure le relief 'utile' du bassin, en écartant les extrêmes. Lue directement sur la courbe hypsométrique.

► Indices de pente

Pente moyenne (I) — Méthode classique

$$I = D \cdot L_c / A \quad (\text{m/km})$$

Moyenne pondérée par les surfaces des pentes élémentaires de chaque bande entre deux courbes de niveau consécutives. L_c = longueur totale de toutes les courbes de niveau, D = équidistance, A = superficie. Précise mais très laborieuse à calculer.

Pente moyenne P_m — Formule simplifiée

$$P_m = (D / S) \cdot \sum l_i \quad \text{ou} \quad P_m = D \cdot \sum l_i / A$$

Chaque l_i est la longueur de la courbe de niveau d'ordre i. La somme $\sum l_i$ est curvimétrée sur la carte. P_m s'exprime en m/km. Donne de bons résultats si le relief est modéré et les courbes de niveau simples.

Indice de pente de Roche (I_p)

$$I_p = (\sqrt{D} / L) \cdot \sum \sqrt{\beta_i}$$

β_i = pourcentage de surface entre deux courbes de niveau consécutives. Calculé sur le rectangle équivalent. Plus facile que I. Fortement corrélé à I_g (relation empirique : I_g ≈ 0,8 · I_p²). Adapté aux études régionales.

Pente globale I_g (indice O.R.S.T.O.M.)

$$I_g = D / L$$

D = dénivelée H_{5%}–H_{95%} (m) ; L = longueur du rectangle équivalent (km). Indice très simple et rapide, le plus utilisé en pratique. Permet le classement du relief en 7 classes R1 à R7. Attention : I_g diminue quand S augmente pour un même bassin.

► Classification du relief par l'indice I_g (O.R.S.T.O.M.)

Classe	Description	Ig (m/km)	Ds (m)
R1	Relief très faible	$Ig < 0,002$	$Ds < 10 \text{ m}$
R2	Relief faible	$0,002 < Ig < 0,005$	$10 < Ds < 25 \text{ m}$
R3	Relief assez faible	$0,005 < Ig < 0,01$	$25 < Ds < 50 \text{ m}$
R4	Relief modéré	$0,01 < Ig < 0,02$	$50 < Ds < 100 \text{ m}$
R5	Relief assez fort	$0,02 < Ig < 0,05$	$100 < Ds < 250 \text{ m}$
R6	Relief fort	$0,05 < Ig < 0,1$	$250 < Ds < 500 \text{ m}$
R7	Relief très fort	$Ig > 0,1$	$Ds > 500 \text{ m}$

Dénivelée spécifique Ds $Ds = Ig \times \sqrt{A} = D \times \sqrt{(1/L)}$

Corrige l'effet de surface sur Ig (Ig diminue quand A augmente). Ds ne dépend que de l'hypsométrie et de la forme (l/L), permettant de comparer des bassins de tailles différentes. Même classement R1→R7 (seuils en mètres, voir tableau).

💡 La pente du bassin indique le temps de parcours du ruissellement direct et détermine l'amplitude des crues : un relief fort → ruissellement rapide → crue plus intense et plus courte.

CHAPITRE 5 Réseau Hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire. Il peut être caractérisé par trois aspects : sa hiérarchisation, son développement (longueurs) et son profil en long.

► Types de réseaux hydrographiques

Réseau dendritique	Forme arborescente classique, bien hiérarchisé, le plus fréquent. Correspond à une situation hydrologique 'normale'.
Réseau en arête de poisson	Thalweg principal central avec affluents secondaires sur les deux rives. Coefficient de pointe inférieur à la normale car les hydrogrammes des tributaires se fondent difficilement.
Réseau radial	Affluents d'importance similaire convergent vers un même point. Coefficient de pointe supérieur à la normale.
Réseau endoréique	Ne se relie à aucun réseau plus important, converge vers une zone centrale (cuvette, lac). Fréquent en zone aride et karstique.

► Hiérarchisation du réseau — Classification de Strahler

Ordre de Strahler $n+n = n+1$; $n+m = \max(n,m)$

Numérotation hiérarchique : tout cours d'eau sans affluent = ordre 1. La confluence de deux cours d'ordre n donne un cours d'ordre n+1. Un cours recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre. Permet de quantifier la ramification du réseau.

► Lois de Horton

Rapport de confluence Rc $Rc = N_i / N_{i+1} = \text{constante}$

Pour un bassin homogène, le rapport du nombre de cours d'eau d'ordre i au nombre d'ordre $i+1$ est sensiblement constant. Typiquement $R_c = 3$ à 5 . Déterminé graphiquement en portant N_i et i sur un graphique semi-logarithmique.

Rapport des longueurs R_l $R_l = l_i / l_{i-1} = \text{constante}$

La longueur moyenne des cours d'eau d'un ordre donné est proportionnelle à celles de l'ordre précédent. Typiquement $R_l = 2$ à 3 . Même méthode graphique que R_c .

► Autres caractéristiques du chevelu hydrographique

Densité de drainage D_d $D_d = \sum l_i / A \quad (\text{km}^{-1})$

Longueur totale des cours d'eau de tous ordres rapportée à la surface du bassin. Reflète la densité du chevelu et la perméabilité des sols : D_d élevé $\rightarrow$ sols imperméables $\rightarrow$ ruissellement rapide $\rightarrow$ crues fortes et courtes. D_d faible $\rightarrow$ sols perméables $\rightarrow$ infiltration dominante.

Fréquence des thalwegs d'ordre 1 (F_1) $F_1 = N_1 / A \quad (\text{km}^{-2})$

Densité des thalwegs de premier ordre (les plus petits éléments du réseau). Indicateur de la finesse du drainage. Corrélé à la densité de drainage D_d .

Dégradation hydrographique

En zone à faible pente ou aride, le lit du cours d'eau peut se dégrader d'amont en aval : lit mineur non continu, dispersion dans des bras, formation de mares. La dégradation minorise le coefficient de ruissellement K_r et peut conduire à un débit nul à l'exutoire pour les crues faibles.

► Profil en long du cours d'eau principal

Profil en long

Représente l'altitude du lit du cours d'eau en fonction de la distance à l'exutoire. Permet de calculer la pente moyenne I du cours d'eau par la formule : $1/I = (1/L) \cdot \sum (l_j / \sqrt{i_j})$, où le cours est découpé en tronçons j de longueur l_j et pente i_j constante. La pente moyenne conditionne la vitesse d'écoulement et le temps de concentration.

CHAPITRE 6 Bilan Hydrologique

Équation fondamentale du bilan $\Delta \text{Stock} = \sum \text{Entrées} - \sum \text{Sorties}$

Principe de conservation de la masse appliqué à un bassin versant sur un intervalle de temps Δt . $\Delta \text{Stock} = 0$ si pas de retenue ou sur une longue période. Entrées = pluies + apports amont. Sorties = ruissellement + évapotranspiration + infiltration + prélèvements.

► Composantes du bilan

Entrées	P (pluie sur le bassin) + Q_e (volumes entrants d'amont) + apports directs
Sorties	Q_s (volume sortant à l'exutoire) + E (évaporation) + I (infiltration / pertes) + Pr (prélèvements)

ΔStock	Variation du stockage = variation du niveau de la retenue $\times$ surface + variation nappes. = 0 si pas de stockage.
--	--

► Équation simplifiée sur une longue période (≥ 1 an)

Équation pluie-écoulement-ETR	$P = \text{ETR} + R \quad (\Delta S \approx 0)$
P = pluie annuelle, ETR = évapotranspiration réelle, R = ruissellement annuel (lame écoulée). Sur une longue période, les stocks se stabilisent et $\Delta S \rightarrow 0$. C'est la base de tout bilan hydrologique annuel.	
Lame d'eau écoulée (Le ou Lm)	$L_e = V_{\text{écoulé}} / A \quad (\text{mm})$
Volume total écoulé à l'exutoire pendant une période, ramené à la surface du bassin, exprimé en mm (comme la pluie). Permet de comparer directement précipitation et écoulement. La lame écoulée moyenne interannuelle est notée Lm.	
Coefficient de ruissellement (Kr ou Ke)	$K_r = L_e / P \quad (\text{sans unité, exprimé en } \%)$
Fraction de la pluie qui parvient à l'exutoire sous forme d'écoulement. Varie de 0,02 (sols très perméables, végétation dense) à 0,9 (bassins urbanisés, roche nue). Conditionné par la perméabilité, la pente, le couvert végétal et l'état d'humidité initial.	
Coefficient d'écoulement annuel (Ke)	$K_e = L_m / P_a \quad (\text{exprimé en } \%)$
Version annuelle du coefficient de ruissellement. P_a = précipitation annuelle moyenne sur le bassin. K_e moyen noté $K_{em} = L_m / P_a$. Permet de qualifier la 'productivité' hydrologique du bassin sur le long terme.	
Module hydrologique (Qm)	$Q_m = V_{\text{annuel}} / 31\,536\,000 \quad (\text{m}^3/\text{s})$
Moyenne des débits moyens annuels calculée sur une période la plus longue possible. C'est le débit caractéristique 'de référence' d'un cours d'eau. Permet de comparer des cours d'eau entre eux.	

► Caractéristiques géologiques et leur influence

Sols imperméables (P5)	Ruissellement maximal en crue, étiages quasi nuls (pas de nappe), débits très variables.
Sols karstiques (P4)	Écoulements complexes, infiltration dans les fissures calcaires, sources karstiques alimentant les étiages.
Sols semi-perméables (P3)	Situation intermédiaire, influence modérée sur les crues et les étiages.
Sols perméables (P2)	Forte infiltration, crues atténuées, étiages soutenus par la nappe.
Très perméables (TP)	Ruissellement quasi nul, dunes et arènes épaisses, presque tout s'infiltre.

💡 La végétation joue un double rôle : elle augmente l'évapotranspiration (réduisant le ruissellement) et ralentit le ruissellement (atténuant les crues). Un bassin déboisé produit des crues plus fortes et plus rapides.

CHAPITRE 7 Précipitations & Pluviométrie

► Définitions fondamentales des précipitations

Averse (simple ou complexe)

Épisode pluvieux continu. Une averse simple présente une seule pointe d'intensité. Une averse complexe en présente plusieurs. En hydrologie opérationnelle (zone sahélienne), on raisonne souvent en terme d'averse journalière.

Averse unitaire

Averse simple couvrant l'ensemble d'un bassin, d'intensité suffisante pour entraîner un ruissellement généralisé, et de durée suffisamment courte. Elle produit l'hydrogramme unitaire caractéristique du bassin. Utilisée comme événement de référence dans la méthode Orstom.

Hyétoqramme

Représentation graphique de l'intensité de la pluie en fonction du temps. Montre comment la pluie est distribuée temporellement pendant une averse (intensités initiales, pointe, décroissance). Essentiel pour modéliser la réponse d'un bassin.

Intensité de pluie (i) i en mm/h

Hauteur de pluie tombée par unité de temps. Exprimée en mm/h. Une intensité forte sur une courte durée peut générer plus de ruissellement qu'une pluie faible prolongée, car l'infiltration ne suit pas.

Intensité limite de ruissellement (II)

Seuil d'intensité au-dessous duquel toute la pluie s'infiltré et au-dessus duquel commence le ruissellement. Dépend des caractéristiques du sol et de son état de surface. Fondamentale pour séparer pluie utile et pluie infiltrée.

Pluie utile (Pu)

Partie d'une averse susceptible de donner lieu à du ruissellement — portion ayant dépassé le seuil d'intensité II. C'est la pluie 'active' sur le bassin. Elle dépend des caractéristiques du bassin, du sol et de son état de surface.

► Grandeurs pluviométriques clés

Pluie journalière décennale (P10) Lue sur carte ou calculée par ajustement statistique

Hauteur de précipitation journalière équivalée ou dépassée en moyenne une fois en 10 ans. Hauteur de référence pour le calcul de la crue décennale dans les méthodes Orstom et CIEH. Déterminée par interpolation sur les cartes d'isohyètes décennales.

Hauteur pluviométrique annuelle (Pan) Pan en mm/an

Total annuel des précipitations en un site. La moyenne interannuelle (Pa) est la moyenne de tous les Pan. La médiane (Pmed) est la valeur atteinte ou dépassée une année sur deux.

Coefficient d'abattement (A) $A = 1 - [(161 - 0,64 \cdot Pan) \cdot \log S]$ (Vuillaume 1974)

Coefficient de réduction passant de la pluie ponctuelle (en un point) à la pluie moyenne sur le bassin (de superficie S). $A < 1$ toujours. Plus S est grand, plus A est petit. Permet d'obtenir $Pm10 = A \times P10$.

Indice d'humidité du sol de Kohler (IK) $IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) \cdot e^{(-k \cdot \Delta t)}$

Indice tenant compte des précipitations antérieures pour estimer l'état d'humidité initial du sol avant une averse. k = coefficient d'assèchement ; Δt = durée depuis la pluie précédente. Un sol humide produit plus de ruissellement.

CHAPITRE 8 Infiltrabilité, Ruissellement & Écoulement

► Infiltrabilité des sols

Infiltrabilité

Aptitude d'un terrain à absorber l'eau de pluie. Qualitative et difficile à mesurer. Dépend de la nature du sol, de sa structure, de son état de surface et de son état d'humidité. Paramètre crucial pour calculer le ruissellement.

► Classes d'infiltrabilité (méthode Orstom / Rodier)

TI (Théorique Imperméable)	N'existe pas à l'état naturel (béton non fissuré). Référence théorique.
I — Imperméable	≥85-90% de surfaces imperméables : roches nues, regs argileux, glacis, argiles à pellicule imperméable.
RI — Relativement Imperméable	Mélange 50/50 de sols imperméables et perméables, ou sols avec végétation réduisant les pellicules.
P — Perméable	Éboulis rocheux, cuirasses ferrugineuses disloquées, sables sans pellicule, sol avec couvert végétal.
TP — Très Perméable	Dunes, arènes épaisses, carapaces très fissurées, affleurements très diaclasés à faible pente.

► Composantes de l'écoulement

Ruissellement superficiel (ou rapide)

Partie de la pluie qui s'écoule en surface sans pénétrer dans le sol. Arrive rapidement à l'exutoire. C'est la composante dominante en zone sahélienne et sur les bassins imperméables. Représenté sur l'hydrogramme par la pointe de crue.

Écoulement retardé

Écoulement qui parvient à l'exutoire avec un retard dû à un stockage temporaire en surface (végétation, micro-relief) ou dans les couches superficielles du sol. Représente la 'queue' de l'hydrogramme après la pointe.

Écoulement de base

Partie de l'écoulement due à la restitution des nappes souterraines. Assure un débit minimum même en l'absence de pluie (étiage). Souvent insignifiant en zone sahélienne mais dominant en zone tropicale humide.

► Évapotranspiration

Évapotranspiration potentielle (ETP)

Quantité d'eau maximale qui pourrait être évapotranspirée si l'eau était disponible en quantité illimitée. Dépend du bilan radiatif, de la température, du vent, de l'humidité de l'air. Se calcule par des formules (Penman, Thornthwaite, Hargreaves).

Évapotranspiration réelle (ETR)

Quantité d'eau effectivement évapotranspirée compte tenu de la disponibilité en eau du sol. $ETR \leq ETP$ toujours. En période sèche, $ETR \ll ETP$ car le sol est à sec. $ETR = P - R$ sur longue période (bilan annuel).

CHAPITRE 9 Crues — Concepts, Hydrogramme & Caractéristiques

Crue

Période de hautes eaux consécutive à une ou plusieurs averses. Se manifeste par une montée rapide du débit, un maximum (pointe de crue), puis une décrue progressive. En zone sahélienne, les crues sont généralement courtes et intenses.

► L'hydrogramme de crue — Anatomie complète

Hydrogramme de crue

Graphique du débit en fonction du temps pendant et après une crue. Il est la 'signature' hydrologique d'un bassin versant soumis à une averse. Composé de la montée, de la pointe et de la décrue.

Temps de montée (Tm)

Durée entre le début du ruissellement (point A sur l'hydrogramme) et le débit maximum (point B). Correspond à la branche ascendante. Plus le bassin est compact et pentu, plus Tm est court et la crue violente.

Débit de pointe Qmax

Débit instantané maximum atteint pendant la crue (point B sur l'hydrogramme). C'est la grandeur la plus critique pour dimensionner les ouvrages hydrauliques (ponts, dalots, déversoirs de barrage). Ne pas confondre avec le débit moyen de crue.

Débit ruisselé maximum Qr

Débit maximum dû au seul ruissellement superficiel rapide (différence entre débit au point B et débit au point B' de l'écoulement retardé). En zone sahélienne, $Q_r \approx Q_{max}$ car l'écoulement retardé est faible (3 à 6% de Q_{max}).

Temps de base (Tb)

Durée totale du ruissellement rapide, entre le début (point A) et la fin (point C) du ruissellement. Permet de calculer le débit moyen de crue : $Q_{mr} = V_r / T_b$.

Débit moyen de crue Qmr $Q_{mr} = P_m \cdot K_r \cdot S / T_b$

Débit défini par le rapport entre le volume ruisselé et le temps de base. P_m = pluie moyenne, K_r = coefficient de ruissellement, S = superficie, T_b = temps de base. Représente l'épaisseur de l'hydrogramme.

Coefficient de pointe α $\alpha = Q_{max_ruisselé} / Q_{mr}$

Rapport du débit maximum ruisselé au débit moyen ruisselé. Mesure l'acuité (piquant) de la pointe de crue. Plus α est grand, plus la crue est 'pointue'. Dépend de la forme du bassin, de la répartition de la pluie et du réseau hydrographique.

► Volume et lame ruisselée

Volume ruisselé (V_r)

Aire délimitée par l'hydrogramme de ruissellement rapide. $V_r = P_m \times K_r \times S$. Exprimé en m^3 ou en mm (lame ruisselée = V_r/S). La lame ruisselée peut être directement comparée à la pluie.

Temps de concentration (t_c)

Durée nécessaire pour qu'une particule d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin parvienne à l'exutoire. C'est la durée critique de la pluie au-delà de laquelle toute la surface contribue simultanément au ruissellement. Conditionne le calcul de la pluie efficace.

Formule de Kirpich (t_c) $t_c = 0,0195 \cdot L^{0,77} / I^{0,385}$ (minutes)

L en mètres = longueur du cours principal ; I en m/m = pente longitudinale. Formule empirique pour estimer le temps de concentration. Plusieurs autres formules existent (Ventura, Passini). Toutes donnent des résultats approximatifs.

Hydrogramme unitaire (HU)

Hydrogramme théorique correspondant à une averse unitaire (pluie efficace de 1 mm uniformément répartie sur le bassin). C'est l'opérateur de transfert du bassin : connaissant l'HU, on peut prédire l'hydrogramme pour n'importe quelle pluie par convolution.

💡 La crue décennale (période de retour $T = 10$ ans) est la crue provoquée par une pluie décennale dans les conditions les plus fréquentes (humidité moyenne du sol, végétation normale). Elle sert de référence pour dimensionner les petits ouvrages hydrauliques.

CHAPITRE 10 Méthode ORSTOM (Rodier) — Crue Décennale

La méthode Orstom (ou méthode Rodier) est la principale méthode déterministe pour estimer la crue décennale sur les petits bassins versants non jaugeés d'Afrique sahélienne et tropicale sèche. Elle est basée sur la théorie de l'hydrogramme unitaire.

► Zone d'application

Zone géographique	Afrique de l'Ouest et du Centre, entre les isohyètes 150 mm et 1200 mm, hors frange littorale atlantique (10-20 km).
Superficies concernées	Quelques ha à plus de 1500 km ² . Distinction entre bassins sahéliens < 10 km ² et les autres.
Limite sahélien / tropical sec	Isohyète 800-850 mm annuels. Deux régions climatiques traitées séparément dans la méthode.

► Formule centrale de la méthode ORSTOM

Débit de pointe décennal Q_{10} $Q_{10} = \alpha_{10} \cdot K_{r10} \cdot A \cdot P_{m10} / T_{b10}$

α_{10} = coefficient de pointe décennal (souvent assimilé à une constante selon la région). K_{r10} = coefficient de ruissellement décennal. A = superficie (km²). P_{m10} = pluie décennale moyenne sur le bassin = $A \times P_{10}$. T_{b10} = temps de base décennal (heures).

► Paramètres à déterminer étape par étape

P10 — Pluie décennale ponctuelle	Lue sur les cartes d'isohyètes décennales (cartes CIEH 1985) par interpolation selon la latitude et la longitude du bassin. Assimilée à la pluie journalière décennale.
A — Coefficient d'abattement (A)	$A = 1 - [(161 - 0,64 \cdot Pan) \cdot \log S]$ (Vuillaume 1974). Réduit la pluie ponctuelle P10 à la pluie moyenne sur le bassin $P_{m10} = A \times P_{10}$.
Kr10 — Coeff. de ruissellement décennal	Déterminé par abaques en fonction de la classe d'infiltrabilité du sol, de la superficie S, de l'indice global de pente Ig et des précipitations annuelles. Varie de 0,02 (très perméable) à 0,80 (imperméable).
α_{10} — Coefficient de pointe décennal	Rapport Q_{max}/Q_{mr} . Souvent traité comme une constante régionale. Lié à la forme du réseau et à la superficie. Pris en compte dans les abaques.
Tb10 — Temps de base décennal	Temps total du ruissellement, estimé par abaques en fonction de S et Ig. S'exprime en heures.

► La Check-list — Corrections locales

Check-list Orstom

Questionnaire qui invite le projeteur à corriger le résultat de base en tenant compte de particularités locales : type de réseau hydrographique (radial, arête de poisson), dégradation du réseau, pourcentage de zones cultivées, présence d'ouvrages et d'aménagements, côte littorale. Ces corrections peuvent multiplier ou diviser le débit estimé par un facteur important.

 La précision de la méthode Orstom est de l'ordre de 50 à 100% d'erreur sur la valeur décennale. Ce chiffre peut sembler élevé, mais il est inhérent à la nature des données sur des bassins non jaugés. Il est recommandé d'utiliser plusieurs méthodes et de comparer les résultats.

CHAPITRE 11 Méthode CIEH — Crue Décennale

La méthode CIEH (Comité Interafricain d'Études Hydrauliques), développée initialement par Auvray, est une méthode empirique basée sur l'analyse statistique de 162 bassins versants africains. Elle utilise des régressions multiples liant le débit décennal aux caractéristiques physiques et pluviométriques.

► Principe de la méthode CIEH

Régressions multiples CIEH

Le débit de pointe décennal Q_{10} est estimé par des équations de régression reliant Q_{10} à des variables explicatives : superficie S, indice de pente Ig, pluie décennale P10, densité de drainage Dd, précipitation annuelle Pan. Les coefficients varient selon la zone climatique.

► Différences clés ORSTOM vs CIEH

ORSTOM (déterministe)	Basée sur la physique du processus pluie-ruissellement (hydrogramme unitaire). Paramètres physiques mesurés. Plus d'étapes de calcul mais plus transparent.
CIEH (statistique/empirique)	Basée sur des régressions statistiques sur 162 bassins. Plus rapide mais plus 'boîte noire'. Précision similaire à ORSTOM.
Convergence des méthodes	Il est recommandé d'appliquer les deux méthodes : si les résultats convergent (facteur < 2), la valeur est fiable. Si divergence forte, investigation plus poussée nécessaire.

► Passage de la crue décennale à la crue centennale

Rapport Q100/Q10 (Gradex)

La méthode du Gradex (Grésillon et al. 1977) permet d'estimer la crue centennale à partir de la crue décennale. Au-delà d'une certaine période de retour, le gradient de croissance des précipitations se retrouve intégralement dans les débits. Valeurs indicatives : $Q100/Q10 \approx 0,45$ en zone sahélienne, $\approx 0,38$ en zone tropicale (rapport des pluies centennale/décennale).

CHAPITRE 12 Apports Annuels & Écoulement Annuel

► Grandeurs fondamentales des apports annuels

Année hydrologique

Année correspondant au cycle annuel de variation des débits, découpée de manière que les réserves soient minimales en début et fin de période. En zone sahélienne, elle coïncide souvent avec l'année calendaire (saison sèche longue).

Apports annuels

Ensemble des écoulements superficiels passant à l'exutoire pendant une année. Apprécies en volume V (m^3), débit moyen annuel Q (m^3/s), ou lame écoulée Le (mm). Relation : Le (mm) = V (m^3) / S (km^2) / 1000.

Module hydrologique Q_m

Moyenne interannuelle des débits moyens annuels. Caractéristique fondamentale d'un cours d'eau. Exprimé en m^3/s . Sert de référence pour tous les aménagements et pour comparer des bassins.

Lame écoulée médiane (L_{med})

Valeur de lame écoulée atteinte ou dépassée une année sur deux. Plus robuste que la moyenne en présence de valeurs extrêmes. Utilisée dans les études de ressources en eau.

► Méthodes d'estimation des apports annuels

Méthode Rodier	Basée sur des abaques régionaux reliant la lame écoulée annuelle à la pluie annuelle et à l'infiltrabilité. Adaptée aux bassins sahéliens.
Modèle Girard	Modèle pluie-débit déterministe, plus complexe, simulant le bilan hydrologique mensuel ou annuel.

Méthode Dubreuil-Vuillaume	Équations de régression régionales reliant apports et précipitations annuelles.
Méthode du bilan d'eau des retenues	Pour les retenues collinaires : bilan entrée/sortie/évaporation/infiltration. Directement applicable aux aménagements.

Coefficient d'écoulement annuel de fréquence F (Ke_F)	$Ke_F = Le_F / Pa_F$
Rapport de la lame écoulée à la précipitation pour une fréquence F donnée. Le coefficient d'écoulement médian : $Kmed = Lmed / Pmed$. Permet d'évaluer les apports pour différentes fréquences (sèche, médiane, humide).	

CHAPITRE 13 Statistique Hydrologique — Lois de Distribution

L'objectif de la statistique hydrologique est d'estimer la probabilité d'occurrence de valeurs extrêmes (crues, sécheresses) à partir d'une série d'observations. Elle permet de passer de l'observation à la prédétermination.

► Rappels statistiques fondamentaux

Population	Ensemble de toutes les valeurs possibles d'une variable hydrologique (tous les débits annuels passés et futurs d'un cours d'eau).
Échantillon	Sous-ensemble de n observations disponibles. En hydrologie, c'est la série chronologique mesurée à la station.
Moyenne $\bar{x}$	$\bar{x} = (1/n) \cdot \sum x_i$. Mesure de tendance centrale. Sensible aux valeurs extrêmes.
Écart-type s	$s = \sqrt{[1/(n-1)] \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2}$. Mesure de dispersion. En hydrologie, on utilise n-1 (estimateur non biaisé).
Coefficient de variation Cv	$Cv = s / \bar{x}$. Mesure la variabilité relative. Utile pour comparer des séries de différentes amplitudes.
Coefficient d'asymétrie Cs	$Cs = [n / ((n-1)(n-2))] \cdot \sum [(x_i - \bar{x})/s]^3$. Mesure l'asymétrie de la distribution. Si $Cs > 0 \rightarrow$ queue longue à droite (fréquent pour les pluies et débits extrêmes).

► Fréquence et période de retour

Fréquence empirique (F) (Hazen)	$F = i / (n+1)$ ou $F = (i-0,375) / (n+0,25)$
Probabilité de non-dépassement attribuée à la i-ième valeur classée par ordre croissant parmi n observations. La formule de Hazen est la plus couramment utilisée en hydrologie. F est compris entre 0 et 1.	
Période de retour T	$T = 1 / (1 - F)$ ou $T = 1 / (1 - F)$ si F = probabilité de non-dépassement
Inverse de la probabilité de dépassement annuel. T = 10 ans signifie que la valeur a 10% de chance d'être dépassée chaque année (et non qu'elle se produit tous les 10 ans exactement). Fondamental pour le dimensionnement des ouvrages.	

► Ajustement à une loi de probabilité — Principe

Ajustement graphique

1. Classer les n observations par ordre croissant. 2. Attribuer la fréquence empirique $F = i/(n+1)$. 3. Porter les points sur papier probabiliste adapté à la loi choisie. 4. Si les points s'alignent → la loi est acceptable. La droite ajustée permet d'extrapoler vers des périodes de retour non observées.

CHAPITRE 14 Analyse Fréquentielle : Loi de Gauss & Loi de Gumbel

► Loi Normale (Gauss)

Loi Normale $N(\mu, \sigma^2)$

Distribution symétrique en cloche autour de la moyenne μ . Totalement caractérisée par deux paramètres : moyenne μ et écart-type σ . Fréquente pour les précipitations annuelles. Non adaptée aux valeurs extrêmes (asymétriques).

Variable réduite de Gauss (u) $u = (x - \bar{x}) / s$

Transformation centrée-réduite. Ramène toute distribution normale à la loi standard $N(0,1)$ dont les valeurs critiques sont tabulées. Médiane = moyenne pour la loi normale. La courbe de répartition tracée sur papier normal (Henry) est une droite.

Ajustement graphique (loi normale) Papier probabiliste gaussien (diagramme de Henry)

Sur ce papier, les fréquences en abscisse sont transformées par la fonction inverse de la loi normale, de sorte que toute distribution normale s'y représente comme une droite. L'axe des ordonnées porte la variable x .

► Loi de Gumbel (valeurs extrêmes type I)

Pourquoi Gumbel en hydrologie ?

Les maximums annuels de débit ou de précipitation suivent souvent une loi des valeurs extrêmes. La loi de Gumbel (type I) est la plus adaptée pour les crues. Elle est asymétrique (queue longue vers les grandes valeurs), ce qui est cohérent avec la nature des phénomènes extrêmes.

Variable réduite de Gumbel (y) $y = -\ln(-\ln(F))$

Transformation non-linéaire de la fréquence F . Sur le papier de Gumbel, l'axe des abscisses représente y (et la période de retour T en regard), de sorte que toute distribution de Gumbel s'y représente comme une droite.

Paramètres de Gumbel (méthode des moments) $\alpha = 1,2825 / s$; $u = \bar{x} - 0,5772 / \alpha$

α = paramètre d'échelle (en 1/unité de x). u = paramètre de position (mode de la distribution). $\bar{x}$ = moyenne de l'échantillon. s = écart-type. Ces paramètres suffisent pour tracer la droite de Gumbel.

Droite de Gumbel $x_T = u + (1/\alpha) \cdot y(T)$; $y(T) = -\ln(-\ln(1-1/T))$

Relation entre la valeur x_T de période de retour T et la variable réduite y . Une fois α et u estimés, la droite peut être tracée sur papier de Gumbel. On lit x_T directement pour n'importe quel T désiré.

Ajustement graphique (loi de Gumbel)

1. Classer les observations par ordre croissant. 2. Calculer la fréquence empirique $F = i/(n+1)$. 3. Calculer $y = -\ln(-\ln(F))$. 4. Porter les points (y, x) sur le papier de Gumbel. 5. Si les points s'alignent, la droite est tracée par régression ou par les paramètres α et u .

► Comparaison Gauss vs Gumbel

Critère	Loi Normale (Gauss)	Loi de Gumbel
Symétrie	Symétrique	Asymétrique (queue droite)
Usage	Pluies annuelles	Crues, max annuels
Variable réduite	$u = (x - \bar{x})/s$	$y = -\ln(-\ln(F))$
Papier probabiliste	Papier Henry (normal)	Papier de Gumbel
Nb paramètres	2 (μ, σ)	2 (u, α)

💡 En pratique, on teste plusieurs lois (Gauss, Gumbel, Log-normale, Pearson III) et on choisit celle qui ajuste le mieux les données observées selon des tests statistiques (χ^2 ou Kolmogorov-Smirnov) ou visuellement sur papier probabiliste.

CHAPITRE 15 Hydro-métrie — Mesure des Débits

L'hydrométrie est la science de la mesure des hauteurs d'eau et des débits dans les cours d'eau. Sans données hydrologiques, aucune méthode statistique ni aucun modèle ne peut être appliqué avec fiabilité.

► Mesure du niveau d'eau (hauteur)

Échelle limnimétrique	Règle graduée fixée à demeure sur un support (pont, digue) permettant la lecture visuelle du niveau d'eau. Lecture manuelle, nécessite un observateur.
Limnigraphe	Appareil enregistrant en continu la variation du niveau d'eau en fonction du temps. Mécanique (à flotteur), pneumatique ou électronique (capteur de pression). Produit un limnigamme.
Limnigamme	Courbe du niveau d'eau en fonction du temps enregistrée par le limnigraphe. Analogue à l'hydrogramme mais en niveau (cm) et non en débit (m^3/s).

► Courbe de tarage — Passage hauteur → débit

Courbe de tarage ($H \rightarrow Q$)

Relation expérimentale entre la hauteur d'eau mesurée à l'échelle H et le débit Q à la même section. Établie par jaugeages successifs à différentes hauteurs. Permet de convertir automatiquement le limnigamme en hydrogramme. Doit être vérifiée et mise à jour régulièrement (variation du fond du lit).

► Jaugeage — Mesure directe du débit

Jaugeage au moulinet

Mesure de la vitesse en plusieurs points de la section par un courantomètre (moulinet). $Q = \sum V_i \times A_i$. Méthode de référence, précise mais laborieuse. Nécessite un accès à la rivière.

Jaugeage chimique (dilution)	Injection d'un traceur (sel, fluorescéine) à débit constant. Mesure de la concentration à l'aval. $Q = Q_{inj} \times C_{inj} / C_{aval}$. Adapté aux torrents turbulents inaccessibles.
Jaugeage par flotteurs	Mesure de la vitesse de surface par flotteurs, corrigée ($\times 0,85$ à $0,90$). Méthode sommaire mais applicable en crue quand aucun autre accès n'est possible.
ADCP (Acoustique)	Profileur acoustique Doppler. Mesure la vitesse en 3D dans toute la section depuis un bateau. Méthode moderne, rapide et précise.

► Réseau de mesures hydrologiques

Réseau original
Ensemble des stations créées initialement pour des problèmes particuliers (alimentation en eau, navigation, protection contre les crues). Hétéroclite mais constitue la banque de données historique fondamentale.
Réseau rationalisé
Réseau optimisé : suppression des stations redondantes (sur-observées), création dans les zones sous-observées, sur la base d'une étude du milieu hydrologique. Objectif : maximum d'information avec minimum de stations.
Station tertiaire (ou de projet)
Station temporaire créée pour un projet spécifique. Observée sur une courte période puis corrélée avec les données plus longues des stations du réseau original voisin pour étendre la période d'observation.

CHAPITRE 16 Synthèse des Formules Clés

BASSIN VERSANT	
Kc (Gravelius)	$Kc = 0,28 \times P / \sqrt{A}$
KH (Horton)	$KH = S / L^2$
Rectangle équiv. L	$L = (P + \sqrt{P^2 - 16S}) / 4$
Allongement (a)	$a = L / \sqrt{S}$

PENTES & RELIEF	
Dénivelée D	$D = H_{5\%} - H_{95\%}$
Pente moyenne Pm	$Pm = D \cdot \Sigma l_i / A \quad (m/km)$
Pente globale Ig	$Ig = D / L$
Dénivelée spéc. Ds	$Ds = Ig \times \sqrt{A} = D \times \sqrt{(L/A)}$

RÉSEAU HYDROGR.	
Densité drainage Dd	$Dd = \Sigma l_i / A \quad (km^{-1})$
Rapport confluence Rc	$Rc = N_i / N_{i+1} = Cte$

Pente moy. cours d'eau	$1/\sqrt{I} = (1/L) \cdot \sum (l_j/\sqrt{i_j})$
------------------------	--

BILAN HYDROL.

Équation bilan	$\Delta \text{Stock} = \Sigma \text{Entrées} - \Sigma \text{Sorties}$
Lame écoulée Le	$Le = V / A \quad (\text{mm})$
Coeff. ruissellement	$Kr = Le / P \quad (\text{ou } \%)$
Bilan annuel	$P = ETR + R \quad (\Delta S \approx 0)$

CRUES (ORSTOM)

Débit pointe Q10	$Q_{10} = \alpha_{10} \cdot Kr_{10} \cdot A \cdot Pm_{10} / Tb_{10}$
Pluie bassin Pm10	$Pm_{10} = A \times P_{10}$
Coeff. abatement A	$A = 1 - [(161 - 0,64 \cdot Pan) \cdot \log S]$
Débit moyen Qmr	$Qmr = Pm \cdot Kr \cdot S / Tb$

STATISTIQUES

Fréquence empirique	$F = i / (n+1)$
Période de retour T	$T = 1 / (1-F)$
Variable réduite u (Gauss)	$u = (x - x^-) / s$
Variable réduite y (Gumbel)	$y = -\ln(-\ln(F))$
Droite de Gumbel	$x_T = u + (1/\alpha) \cdot y(T)$
Paramètres Gumbel	$\alpha = 1,2825/s \quad ; \quad u = x^- - 0,5772/\alpha$

TEMPS CONCENTR.

Formule Kirpich	$t_c = 0,0195 \cdot L^{0,77} / I^{0,385}$ (min)
Coeff. de pointe α	$\alpha = Q_{\text{max_ruisselé}} / Qmr$