

L 'ASSAINISSEMENT... c 'est quoi?

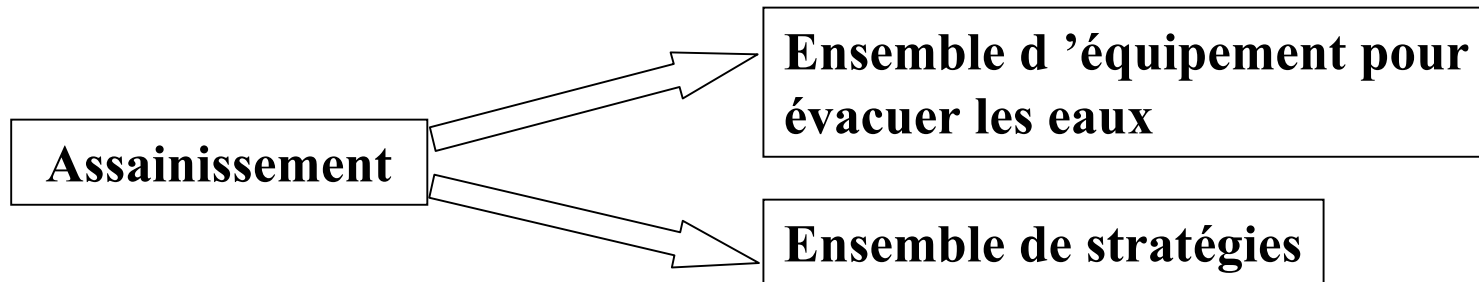
Assainir = « rendre sain »

Aspect technique de l 'HYDROLOGIE URBAINE

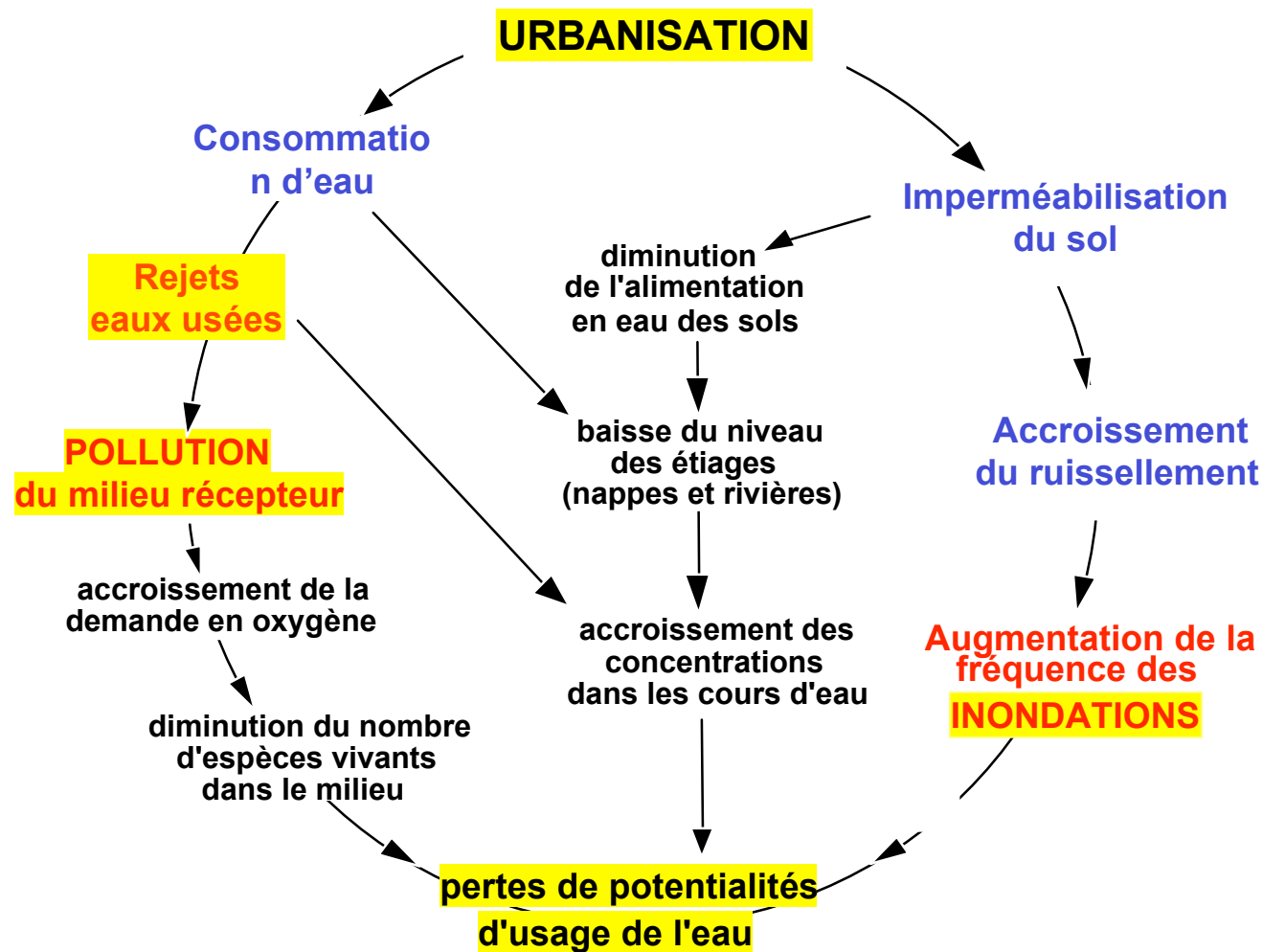
Objectifs:

- ❖ Gestion des eaux usées
- ❖ Gestion des eaux pluviales

- ⇒ protection sanitaire
- ⇒ protection contre les inondations
- ⇒ protection de l 'environnement



Effet de l'urbanisation sur le cycle de l'eau...



UN PEU D 'HISTOIRE...

XIXème siècle - Les Hygiénistes

- ❖ Lutte contre les épidémies
- ❖ Lutte contre les odeurs
- ❖ Augmentation des volumes et des dilutions
- ❖ Influence des hygiénistes

1er réseaux d 'assainissement

- Hambourg 1843
- Londres
- Paris (Haussmann et Belgrand, loi du tout à l 'égout de 1894)

Les grands principes de Belgrand

- un collecteur sous chaque rue
- réseau unitaire
- écoulement gravitaire
- autocurage

Les débits de projets:

- ⇒ 150 l/hab/j
- ⇒ 42 l/s/ha eaux pluviales

UN PEU D 'HISTOIRE...

XXème siècle - Le concept hydraulique

De nouveaux concepts d 'assainissement...

❖ Dégradation des rivières

- ⇒ Traitement des eaux usées
- ⇒ Réseaux séparatifs

❖ 1950: nouvelle vague d 'urbanisation

- formes urbaines nouvelles
- urbanisation rapide en périphérie des agglomérations
- villes nouvelles

- ⇒ Retour à l 'assainissement autonome
- ⇒ Apparition des bassins de retenu
- ⇒ Développement des techniques alternatives

UN PEU D 'HISTOIRE...

XXème siècle - Le concept hydraulique

Rationalisation du dimensionnement des ouvrages

❖ **1930: la méthode rationnelle**

❖ **1949: circulaire CG 1333 (Caquot)**

- ⇒ normalisation des règles sanitaires à l 'échelle nationale
- ⇒ outil technique simple et indiscuté pendant 30 ans

❖ **1977: instruction technique 1977 , remplace la CG 1333**

- ⇒ le modèle de Caquot reste l 'outil de base
- ⇒ actualisation des coefficients du modèle de Caquot et réduction du domaine d 'application

UN PEU D 'HISTOIRE...



L 'heure actuelle - Le concept environnementaliste

De nouvelles exigences

- ❖ **Préservation de l 'environnement et amélioration du cadre de vie**
- ❖ **Exigence accrue en terme de qualité de service**

Des difficultés croissantes

- ❖ **Problèmes de pollution**
- ❖ **Contraintes économiques de plus en plus lourdes**
- ❖ **Poids de l 'existant**

LES DIFFERENTS MODES D'ASSAINISSEMENT

Types de systèmes d'assainissement

Système d'assainissement = système de collecte et de transport des effluents

+ système d'épuration

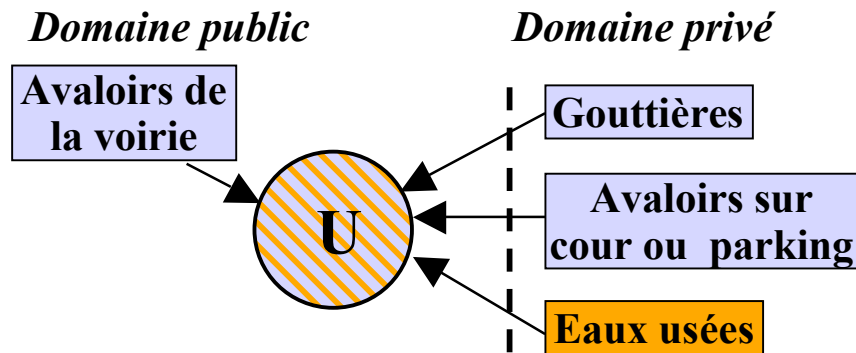
❖ **assainissement autonome**

❖ **assainissement collectif**

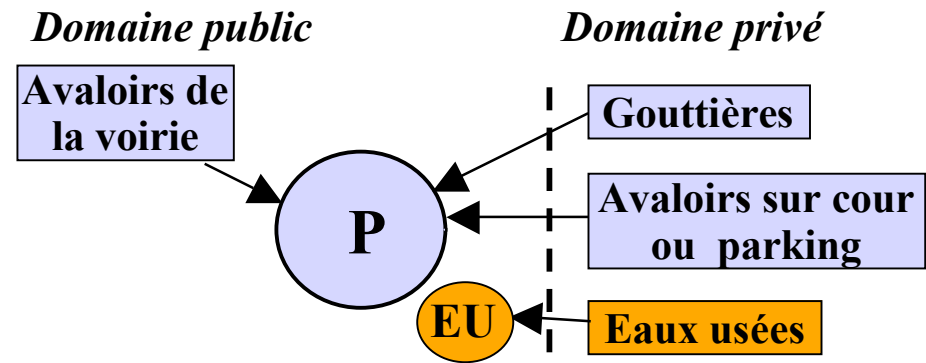
- réseau unitaire
- réseau séparatif ou pseudo séparatif

LES DIFFERENTS MODES D'ASSAINISSEMENT

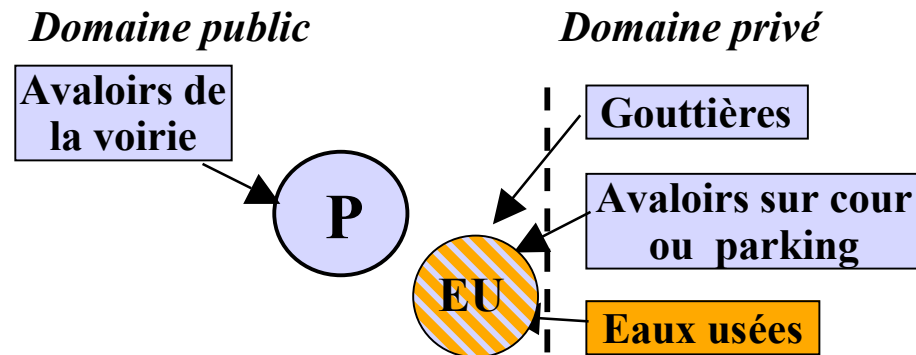
RESEAU UNITAIRE



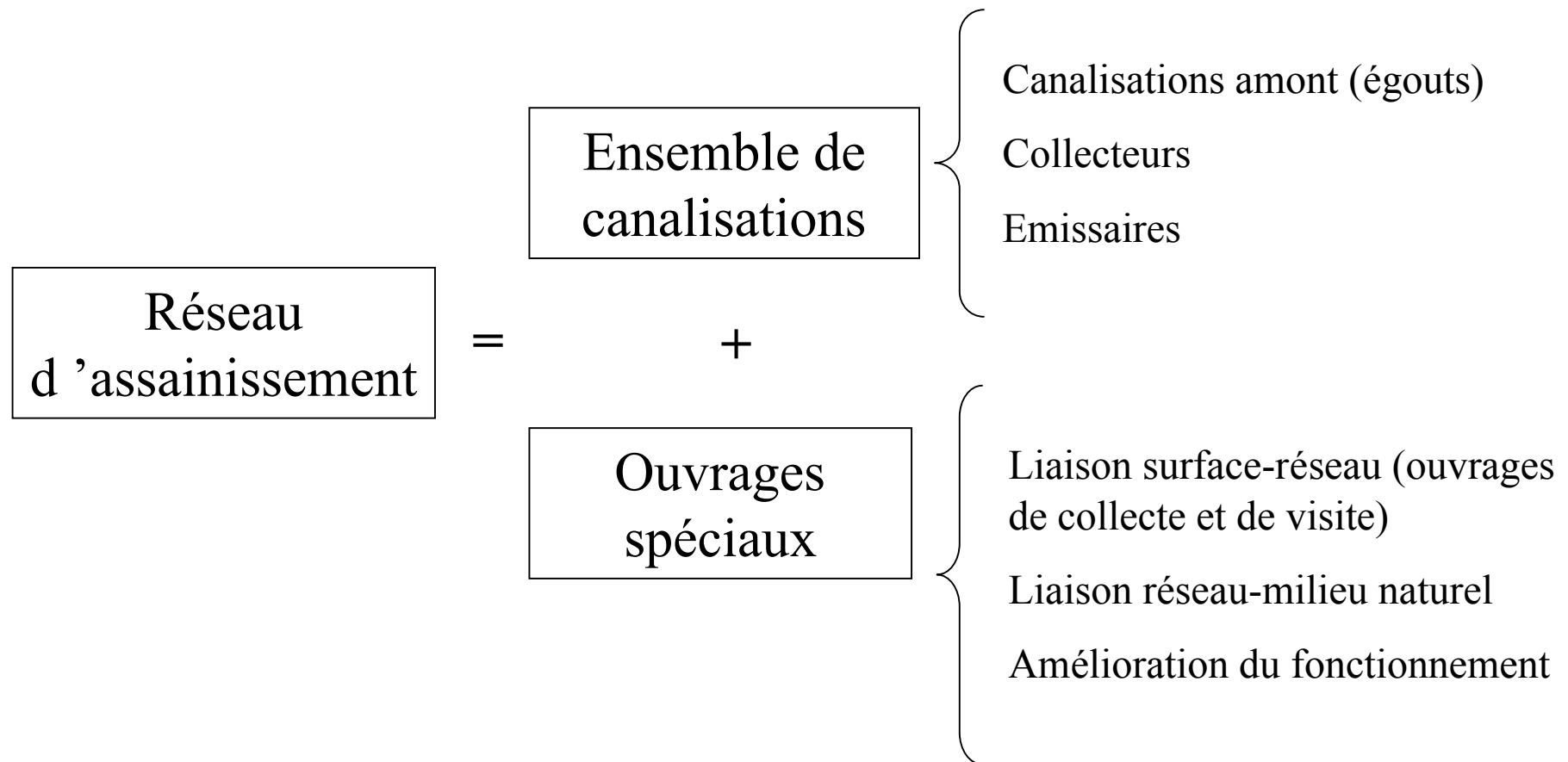
RESEAU SEPARATIF



RESEAU PSEUDO SEPARATIF



MORPHOLOGIE DU RESEAU



MORPHOLOGIE DU RESEAU

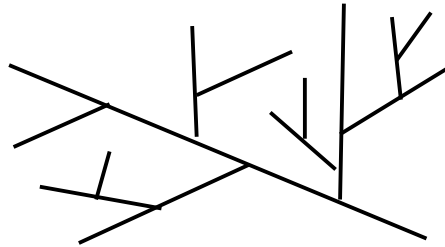
Conditions d 'écoulement

- ❖ **Écoulement gravitaire**
 - ❖ **A surface libre**
 - ❖ **Ecoulement graduellement varié à rapidement varié**
 - ❖ **Possibilités de mise en charge momentanée**
- Cas particuliers (rare) pour les eaux usées uniquement: réseau sous pression ou sous dépression

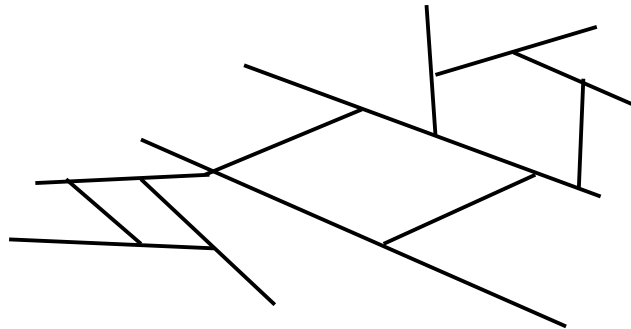
MORPHOLOGIE DU RESEAU

Agencement des canalisations

❖ **réseau ramifié**



❖ **réseau maillé**

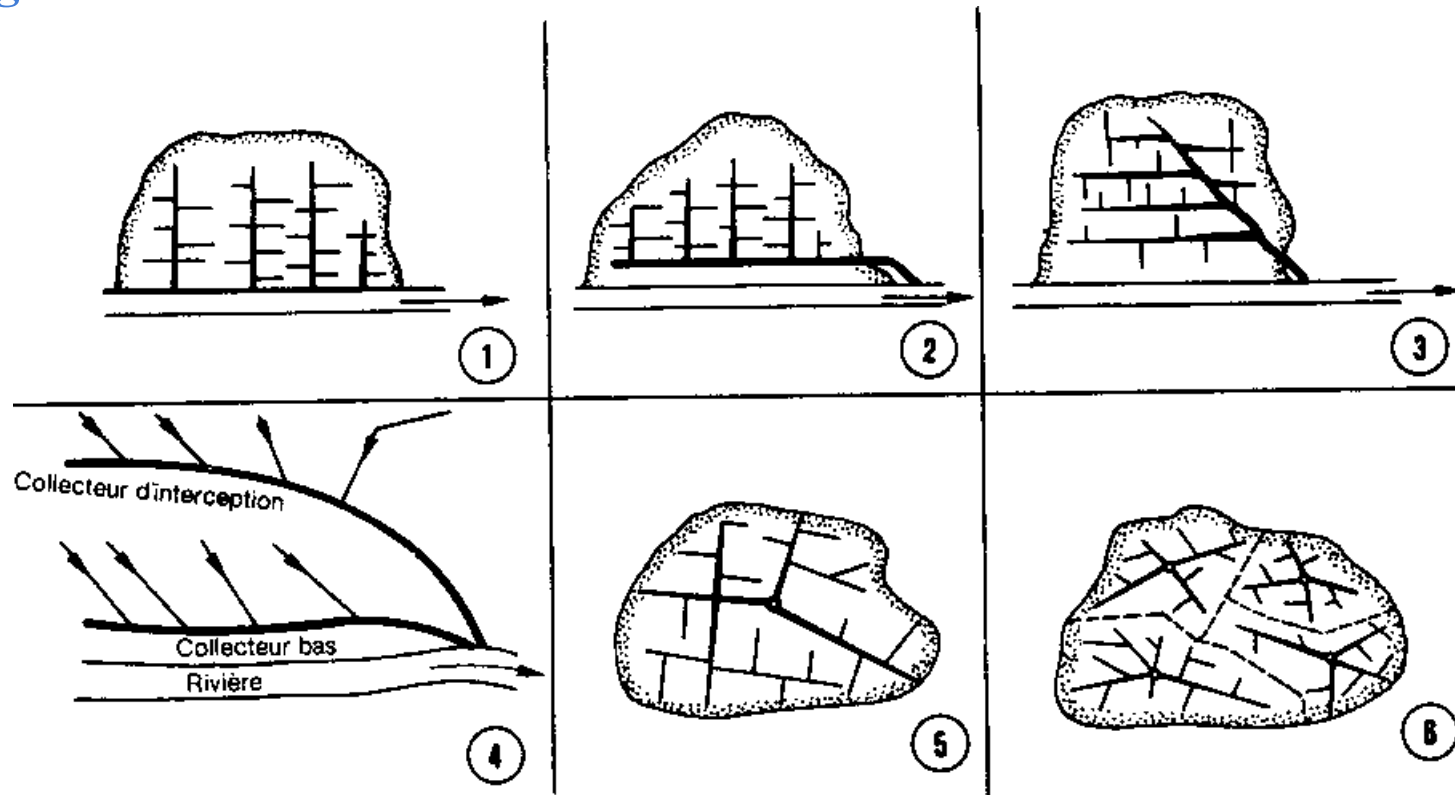


❖ **exutoire unique**

❖ **exutoires multiples**

MORPHOLOGIE DU RESEAU

Agencement des canalisations



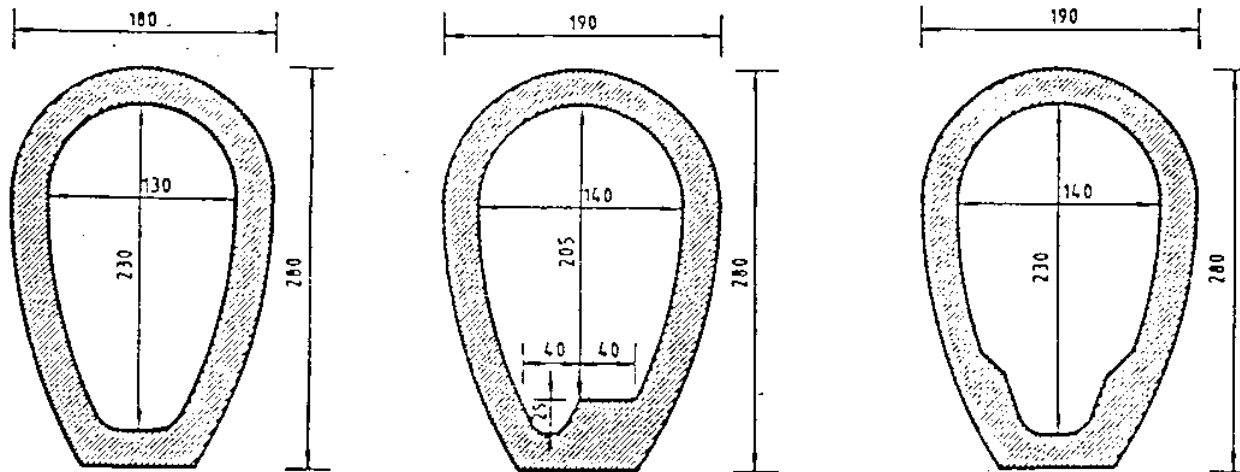
1. Schéma type "perpendiculaire"
2. Schéma type "collecteur latéral"
3. Schéma type "collecteur transversal"
4. Schéma type "zones étagées"
5. Schéma type "centre collecteur unique"
6. Schéma type "radial"

MORPHOLOGIE DU RESEAU

Types et formes de canalisations

- ❖ circulaire ($\varnothing$ 10 cm à > 4 m)
- ❖ ovoïde (hauteur 1 à 2 m)
- ❖ profils particuliers (canalisations visitables)

Exemples: Egouts élémentaires visitables

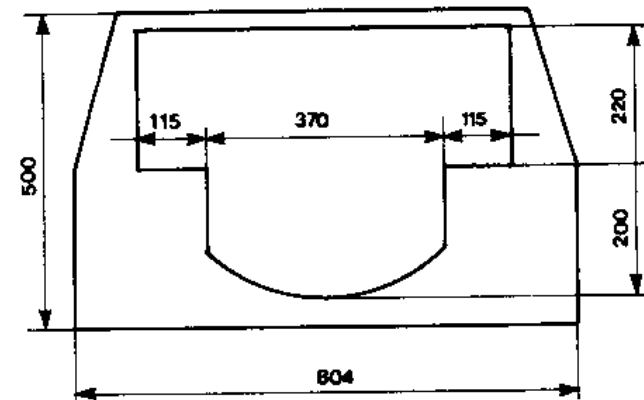
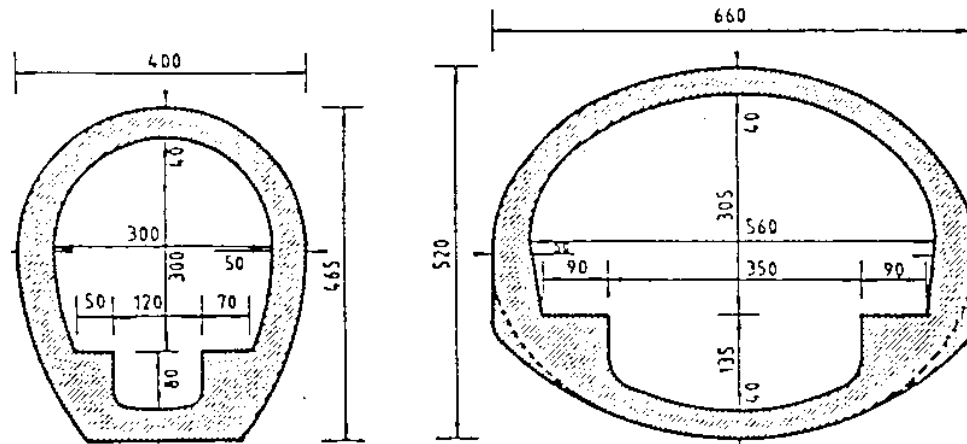


MORPHOLOGIE DU RESEAU

Types et formes de canalisations

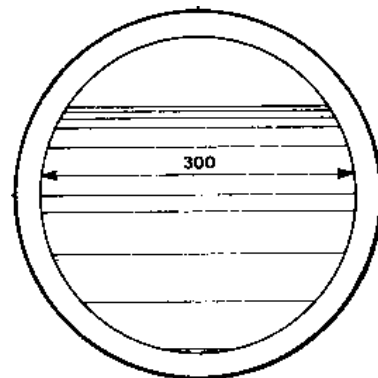
Exemples:

Collecteurs visitables



Exemples:

Emissaire



MORPHOLOGIE DU RESEAU



Caractéristiques nécessaires des canalisations

- ❖ étanchéité
- ❖ inertie à l'action des polluants
- ❖ épaisseur suffisantes pour résister aux surcharges
- ❖ faible rugosité

MORPHOLOGIE DU RESEAU

Matériaux des canalisations

- ❖ **grès**

- ⇒ peu utilisé en France, recommandé pour zones industrielles

- ❖ **fonte ductile**

- ⇒ peu utilisé, pour assainissement « à risque »

- ❖ **matières plastiques (PVC et polyéthylène)**

- ⇒ petites sections circulaires uniquement ($\varnothing < 50$ cm)

- ❖ **amiante ciment (fibrociment)**

- ⇒ caractéristiques voisines du PVC

- ❖ **béton non armé**

- ⇒ utilisé en préfabrication

- ❖ **béton armé**

- ⇒ pour grandes sections

MORPHOLOGIE DU RESEAU

Les ouvrages spéciaux

❖ Liaison surface-réseau

⇒ les ouvrages de collecte

- **branchements particuliers**
- **bouches d 'égouts**

⇒ les ouvrages de visite

❖ Liaison réseau-milieu naturel

⇒ émissaires de rejet

⇒ les déversoirs d 'orage

❖ Dispositifs de stockage des eaux pluviales

⇒ bassins de rétention

⇒ stockages à l'amont

❖ Ouvrages liés au bon fonctionnement du réseau

⇒ réservoirs de chasse

⇒ ouvrages de dessablement

⇒ siphons

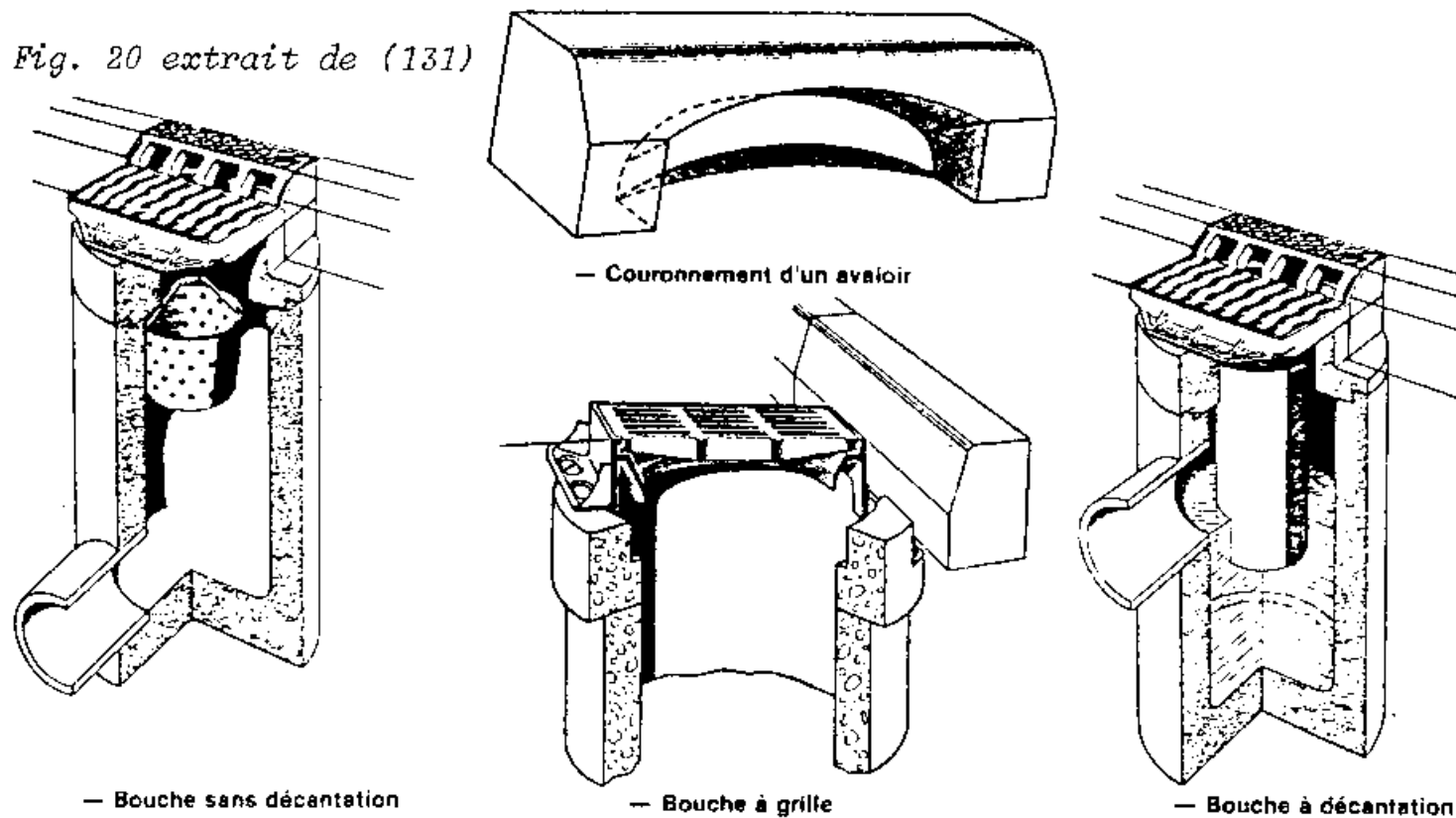
⇒ stations de relèvement

⇒ ouvrages de prétraitement

MORPHOLOGIE DU RESEAU

Ouvrages de collecte des eaux pluviales

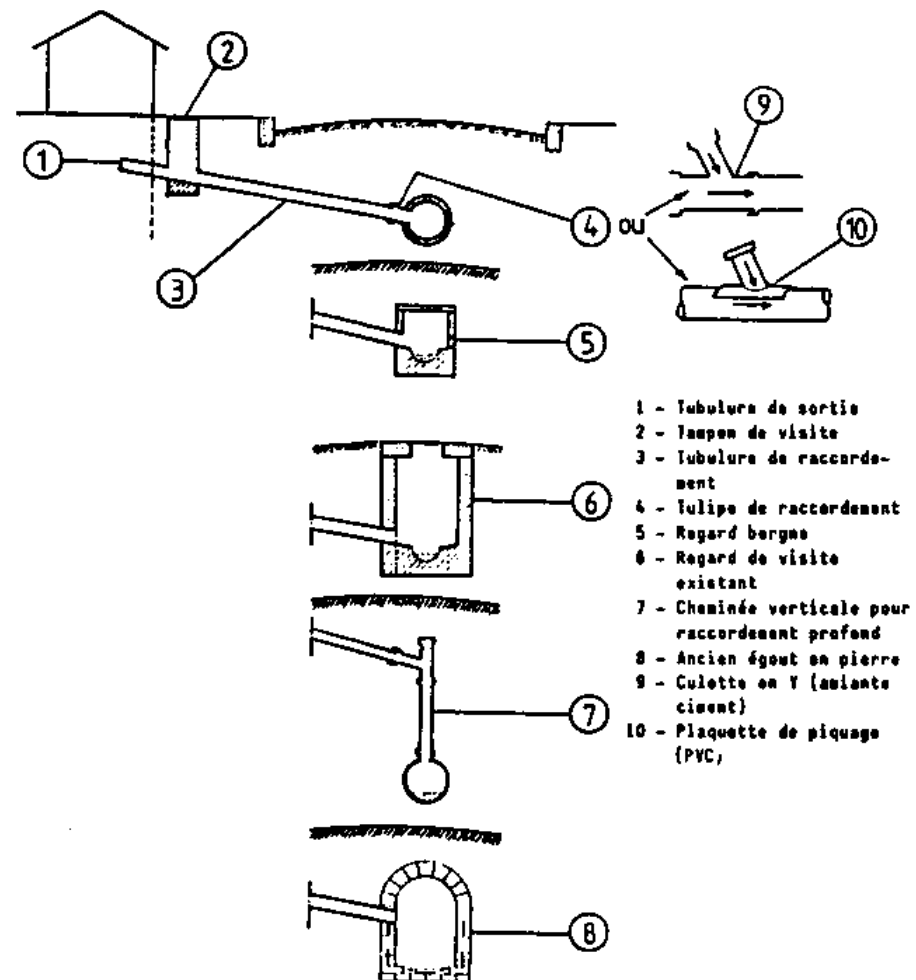
Exemples: Bouches d 'égout



MORPHOLOGIE DU RESEAU

Ouvrages de collecte des eaux

Exemples: Branchements particuliers



MORPHOLOGIE DU RESEAU

Ouvrages de visite

Exemples de regards de visite

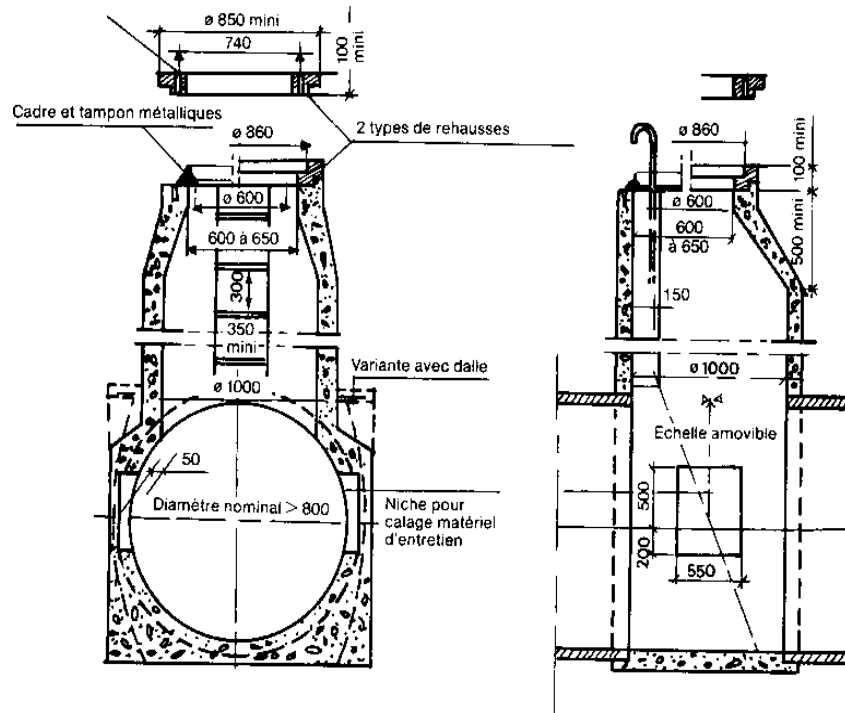


Fig. 56 - Regard de visite à section circulaire de 1 m de diamètre, sur tuyau de diamètre nominal supérieur à 0,80 m. Variantes : avec échelle encastrée, avec échelons saillants.

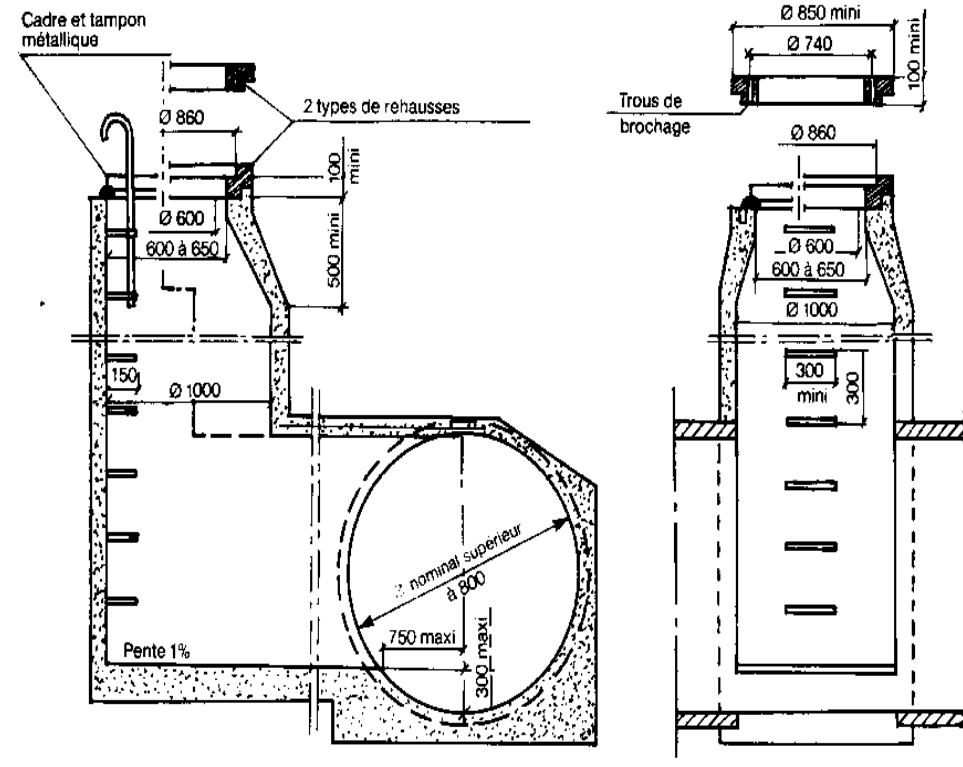
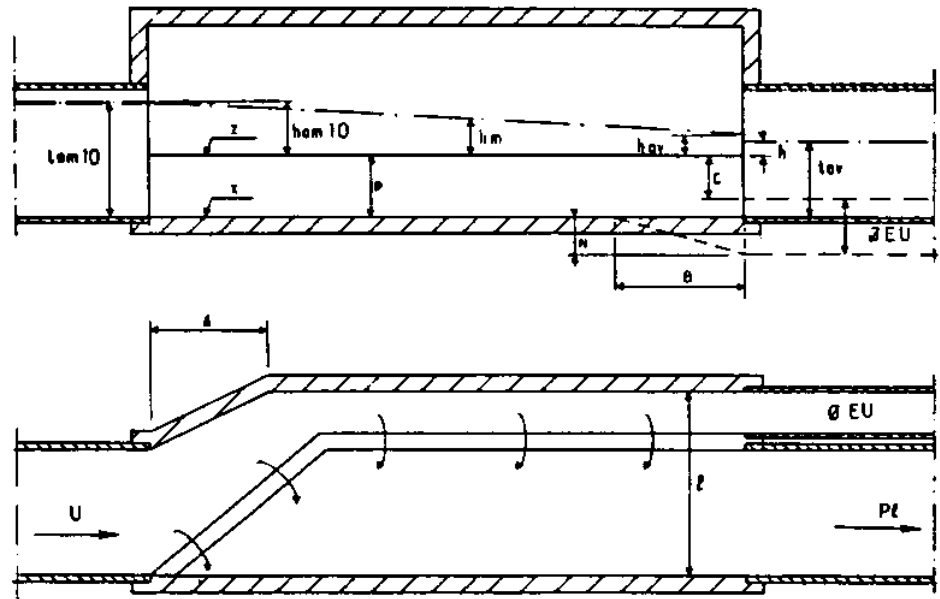
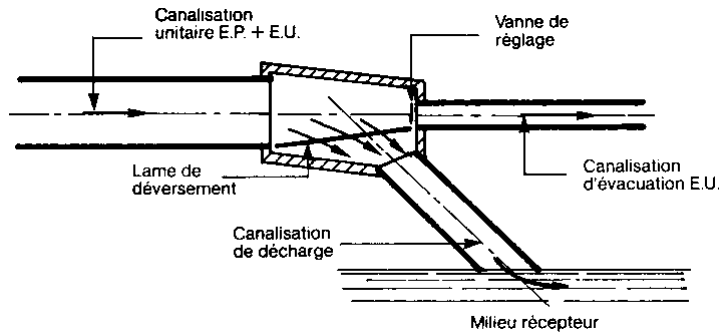


Fig. 57 - Regard de visite à section circulaire de 1 m de diamètre, à accès latéral en dérivation d'une canalisation de diamètre nominal supérieur à 0,80 m. Variantes : avec échelle encastrée, avec échelons saillants.

© 2006 The Authors
Journal compilation © 2006 Blackwell Publishing Ltd

Ouvrages spéciaux

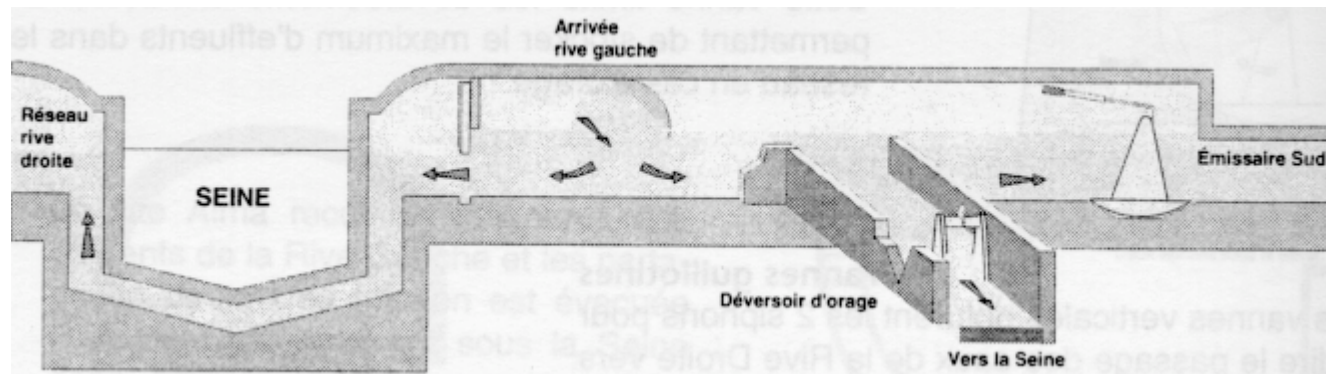
Exemples: Déversoir d 'orage



MORPHOLOGIE DU RESEAU

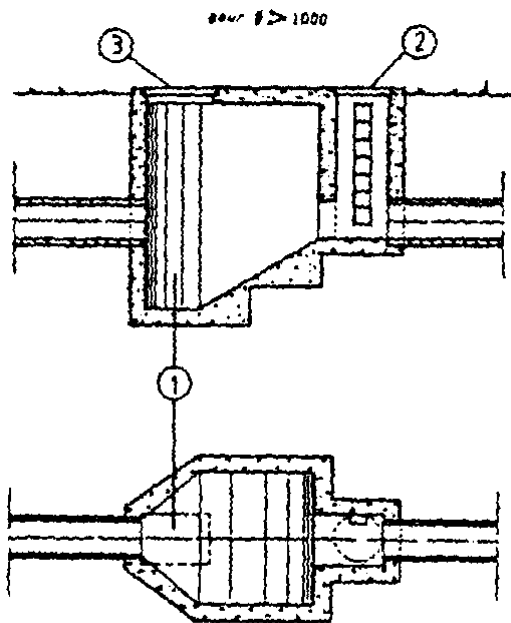
Ouvrages spéciaux

Exemples: Siphon - Déversoir d 'orage - Vanne de régulation



Ouvrages de dessablement

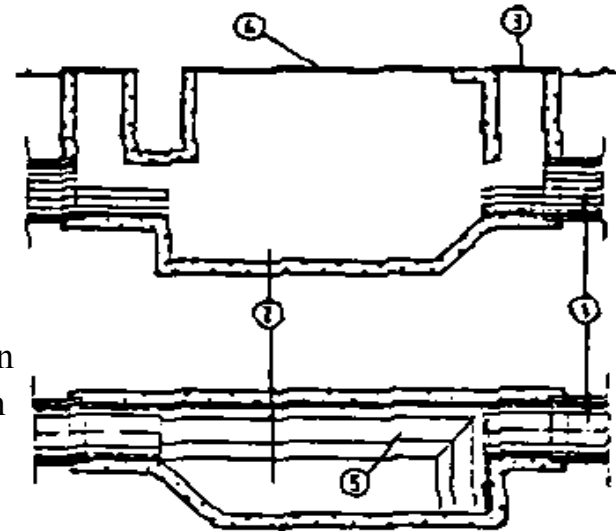
Piège à sable



1. cuvette de rétention
2. regard d'accès
3. regard d'extraction

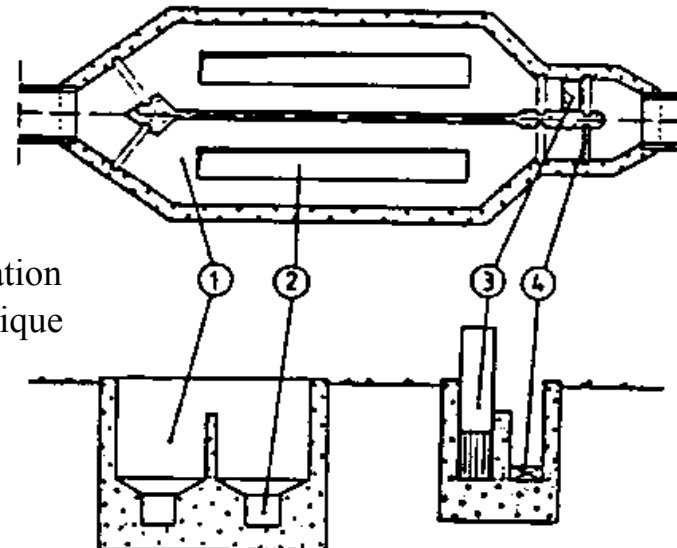
Chambre de dessablement

1. collecteur
2. fosse
3. regard d'accès
4. trappe d'extraction
5. forme de réduction de perte de charge



Dessableur

1. canal
2. cunette à décantation
3. dégrilleur mécanique
4. batardeau



CONCEPTION D'UN SYSTEME D'ASSAINISSEMENT

- ❖ **Choix du mode d'assainissement**
- ❖ **Choix du type de réseau**
- ❖ **Localisation des points de rejets**
- ❖ **Type et implantation des ouvrages de stockage**
- ❖ **Implantation des ouvrages de traitement**
- ❖ **Tracé en plan du réseau**
- ❖ **Dimensionnement**

Pas de solution unique – Analyser plusieurs variantes

CONCEPTION D'UN SYSTEME D'ASSAINISSEMENT

Facteurs qui influent sur la conception du projet d'assainissement

❖ Données naturelles

- Pluviométrie
- Topographie
- Hydrographie
- Géologie

❖ Caractéristiques de l'agglomération

- Importance et nature
- Modes d'occupation du sol
- Assainissement déjà en place
- Développement futur de l'agglomération

❖ Contraintes liées à l'assainissement

- Conditions de transport des eaux usées
- Facilité d'exploitation
- Réduction des nuisances

CONCEPTION D'UN SYSTEME D'ASSAINISSEMENT

Quel type de réseau choisir?

Avantages	Inconvénients	Unitaire+ simple- cher	Perturbation STEPS	Sédimentation par tem

Critères de choix:

- ❖ proximité d'un exutoire naturel
- ❖ sensibilité du milieu récepteur
- ❖ existence d'un réseau ancien
- ❖ pente du terrain (pb autocurage)
 - ⇒ nécessite une étude locale précise

- Tendance actuelle: recours aux techniques alternatives pour les eaux pluviales

CONCEPTION DU RESEAU

Quel type de réseau choisir?

Le réseau séparatif si:

- ❖ **population dispersée + possibilité évacuation des EP par voie superficielle**
- ❖ **nécessité de postes de pompage**

Le réseau unitaire si réseau séparatif pas possible économiquement:

- ❖ **exutoire naturel loin des points de collecte**
- ❖ **surface imperméabilisée très élevée et pentes fortes ⇒ ouvrages importants, visitables avec fortes vitesses**

DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

Procédure

- ❖ **tracé du réseau en plan**
- ❖ **découpage en tronçons de 300 m environ**
- ❖ **délimitation du bassin versant drainé par chaque tronçon**
- ❖ **calcul du débit de pointe généré par ce bassin**
 - ⇒ débit pointe eaux usées
 - ⇒ débit pointe eaux pluviales
- ❖ **calcul des dimensions de la canalisation en fonction de sa pente**
- ❖ **tracé du profil en long de la canalisation**
- ❖ **vérification du bon fonctionnement**

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Critères de dimensionnement (réseaux EU séparatifs)

- ❖ débit de pointe d'avenir des eaux usées
- ❖ débit moyen actuel

Contraintes spécifiques aux eaux usées:

- ❖ diamètre mini: Ø200 mm
 - ⇒ diamètre surabondant en tête de réseau
 - ⇒ estimation du débit nécessaire dans le corps du réseau uniquement
- ❖ réaliser au mieux l'autocurage
 - (éviter dépôts de matières fermentescibles)
 - ⇒ difficile en tête de réseau

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Les différents types d'eaux usées à prendre en compte:

❖ eaux usées domestiques

- ⇒ eaux vannes (WC)
- ⇒ eaux ménagères (cuisine, lessive, toilette)

❖ eaux usées professionnelles

- ⇒ eaux industrielles (raccordement au réseau public soumis à autorisation)
- ⇒ eaux du secteur tertiaire

❖ eaux du service public

- ⇒ grands équipements publics (écoles, hôpitaux, casernes...)
- ⇒ nettoyage de voirie, arrosage, fontaines
- ⇒ réservoirs de chasse

❖ eaux parasites

- ⇒ infiltrations
- ⇒ eaux d'exhaures

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Volume des eaux usées domestiques:

$$V_{eu} = V_{ep} \times r \times (1 - p)$$

- V_{eu} = volume d'eaux usées à évacuer
- V_{ep} = volume d'eau potable distribué
- r = % d'habitants raccordés au réseau
- p = pourcentage des pertes (fuites, rejets directs, arrosage...)
 $p = 20 \text{ à } 30\%$

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Consommation d'eau potable domestique

❖ **Variable dans l'espace et dans le temps**

(niveau de vie , climat, coût de l'eau, type et age de l'habitat)

❖ **Actuellement, en France $\approx$ 100 à 150 l/hab/j**

- dont: eaux vannes 30 l/hab/j
- cuisine 15 l/hab/j
- lessive 16 l/hab/j
- douche, bain, lavabo 38 l/hab/j

❖ **Selon INT 77:**

Q max avenir:

⇒ **considérer la + forte consommation journalière de l'année**

⇒ **200 à 250 l/hab/j (y compris besoins publics courants)**

Q min actuel:

⇒ **considérer uniquement immeubles actuellement raccordés**

⇒ **80 à 150 l/hab/j**

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Difficultés dans l'estimation de la consommation:

- ❖ prévoir la population futur
- ❖ prévoir l'évolution des consommations
- ❖ cas des agglomération à population variable suivant les saisons

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Volume des eaux usées industrielles

- ❖ très variable en fonction de l'activité
- ❖ certaines industries traitent et rejettent directement dans le milieu naturel
- ❖ certaines industries procèdent à un recyclage total ou partiel de l'eau

Méthode d'évaluation

- ❖ industries existantes ou transférées: mesures « in situ »
- ❖ industries futures: évaluation délicate
 - évaluation à partir de données statistiques
 - valeurs moyennes associées à des probabilités de satisfaction

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Volume des eaux usées industrielles

❖ Probabilités de satisfaction

Probabilité de satisfaction	25%	50%	75%	90%	97.5%	Débit moyen spécifique (m ³ /jour/ha)

- Zones d'entrepôts ou haute technicité: 10 à 12 m³/jour/ha loti
- Zones emplois, petite industrie, ateliers: 20 à 25 m³/jour/ha loti
- Zones d'industries moyennes: 50 à 150 m³/jour/ha loti

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Volume des eaux du service public:

❖ Equipements publics

- généralement pris en compte avec eaux domestiques

❖ Nettoyage: très variable en fonction des pratiques locales

- en France: $\approx 25 \text{ l/m/j}$ lavage caniveaux
 $\approx 5 \text{ l/m}^2/\text{j}$ nettoyage marchés
- Paris: 20 à 60 l/hab/j

Volume d'eaux parasites:

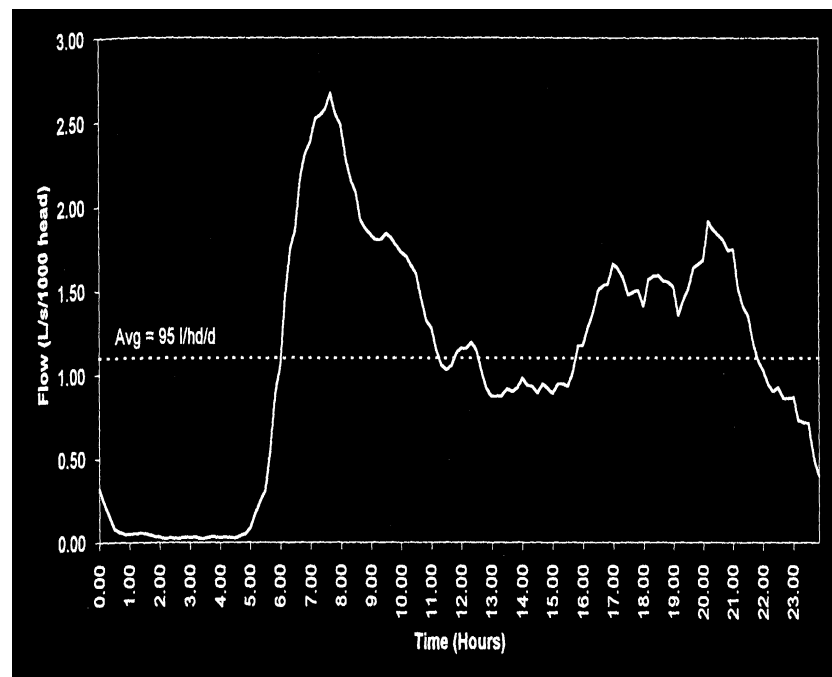
❖ réseau existant: évaluation par mesure du débit nocturne

❖ réseau en conception: minimiser les apports d 'eaux parasites

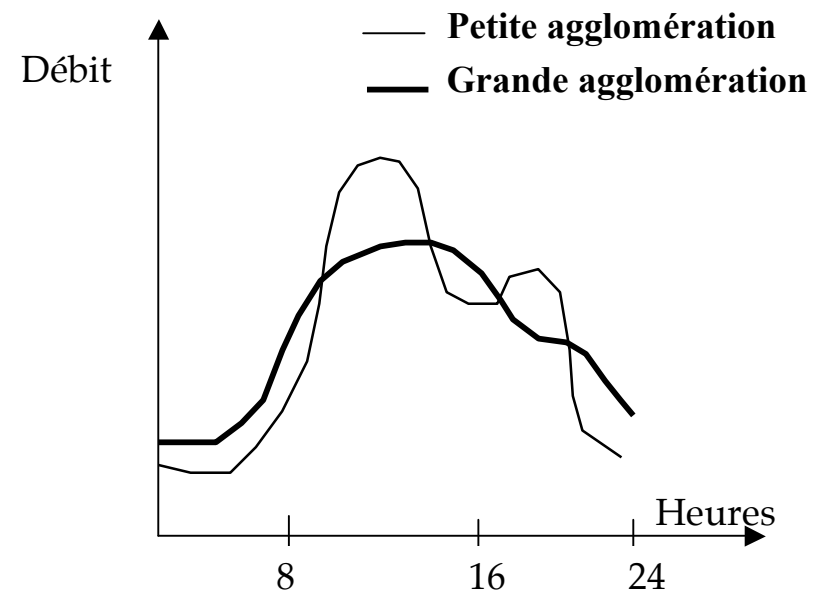
- pose correcte des canalisations
- surveillance régulière des branchements

CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Cycle journalier des eaux domestiques



Cycle journalier des eaux urbaines



CALCUL DU DEBIT D'EAUX USEES

Calcul du débit de pointe Q_p

- ❖ difficulté à prévoir les variations journalières
- ❖ utilisation d'une méthode simplifiée: coefficient de pointe

$$Q_p = p \times Q_{\text{moyen}}$$

Eaux domestiques:

- $p = 1.5 + 2.5 / \sqrt{Q_m}$ (l/s) (INT 77) et $1.5 < p < 4$
- $p \approx 3$ en tête de réseau
- $p \approx 2$ près de l'exutoire

Eaux industrielles:

- $p = 2$ à 3

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

- ❖ **choix d'une période de retour**
 - = choix d'un niveau de risque
- ❖ **détermination de la pluie la plus pénalisante pour cette période de retour**
 - ⇒ analyse de la pluviométrie locale
 - ⇒ analyse statistique des pluies
- ⌘ **calcul du débit maximal engendré par cette pluie**
 - ⇒ transformation de la pluie en débit sur un bassin versant
- ❖ **étude de la propagation et de la combinaison des hydrogrammes à travers le réseau**
 - ⇒ simulation de l'écoulement en réseau

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Pluie = phénomène aléatoire

⇒ Estimer la fréquence d'apparition des événements pluvieux en fonction de leur intensité moyenne maximale $i_{\max}(\Delta t)$

- ❖ Probabilité d'occurrence $P(i)$ = fréquence au dépassement
- ❖ Fréquence au non dépassement $F(i)=1-P(i)$

**$T = 1 / P(i)$ = "période de retour" de l'événement
= durée moyenne entre deux événement
d'importance supérieure ou égale à i**

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

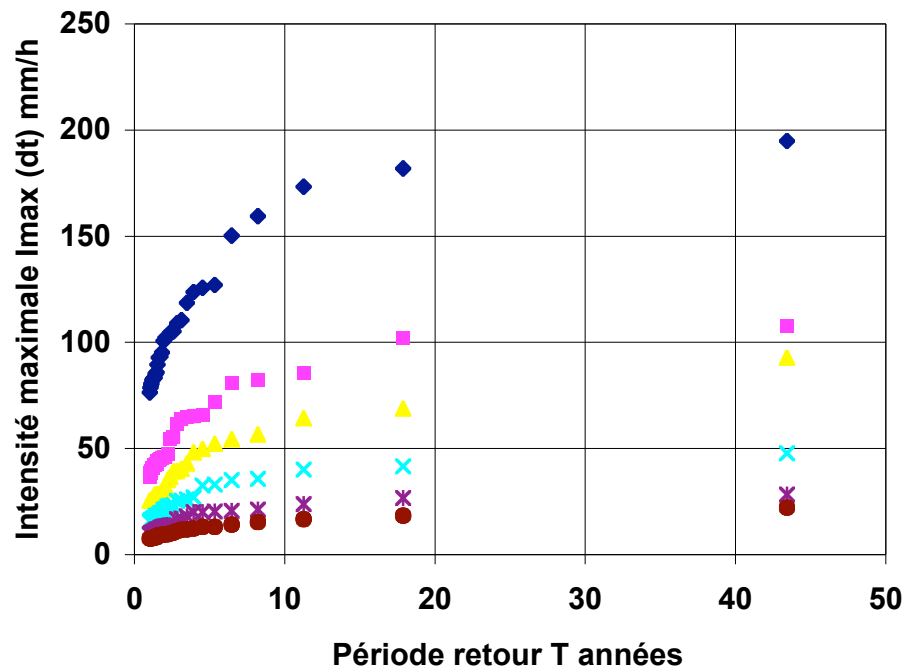
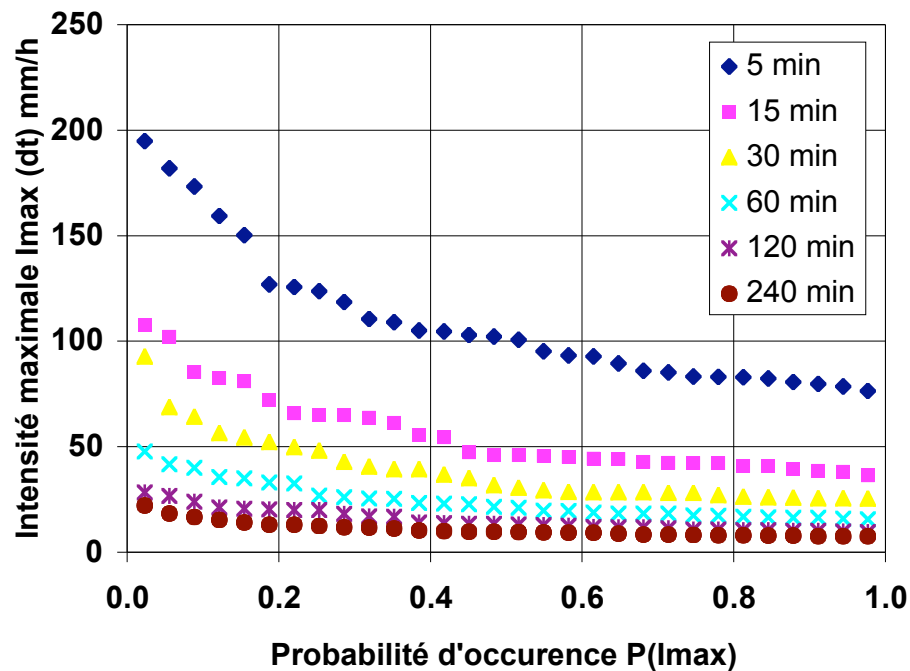
Détermination de la fréquence d'occurrence

- calcul de $i_{\max}(\Delta t)$ pour toutes les pluies sur N_a années de mesures
- sélection de N pluies avec $i_{\max}(\Delta t)$ significatif
 - ⇒ valeurs extrêmes annuelles, saisonnières, mensuelles....
 - ⇒ valeurs supérieures à un seuil
 - ⇒ N_a valeurs les plus fortes observées en N_a années
 - ⇒ R ($R= 2, 3..$) plus fortes valeurs pour chaque année, saison, mois...
- classement par ordre décroissant des $I_{\max}(\Delta t) \rightarrow$ rang r
- $P(i_{\max}, \Delta t) = (r+a)/(N+b)$ a, b : paramètres
 - ex: $P = r / (N+1)$ (formule de Weibull)
 - ex: $P = (r-0.3)/(N+0.4)$
- $T(i_{\max}, \Delta t) = (N+b) / (r+a) \times N_a/N$

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Courbes intensité durée fréquence

❖ Construction des courbes IDF (intensité-durée-fréquence)
empiriques



CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

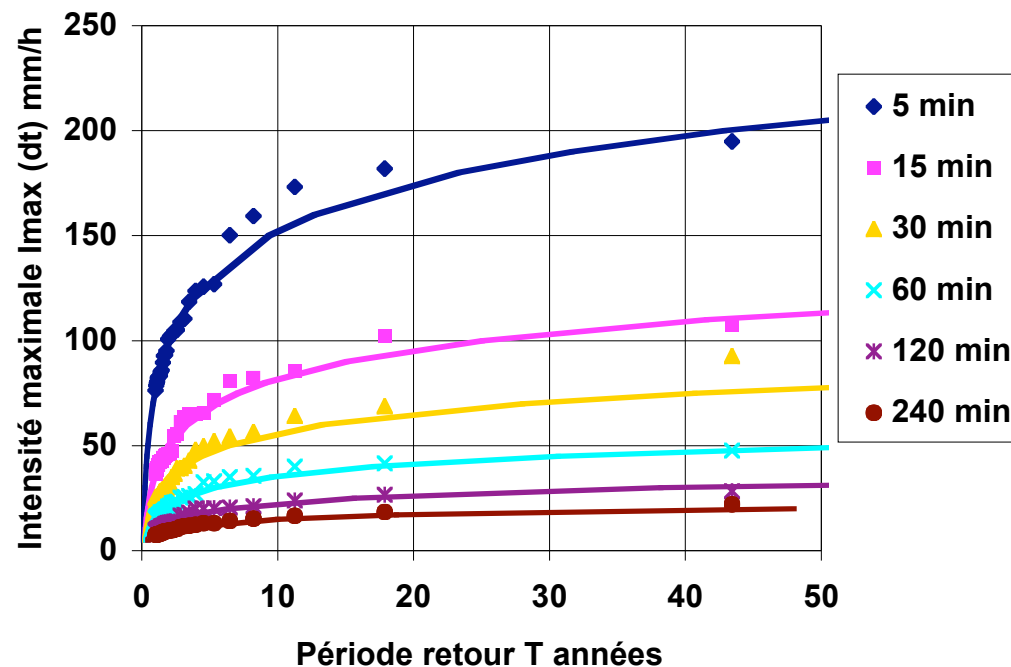
❖ Interpolation et extrapolation des courbes IDF

T = période de retour choisie pour le dimensionnement

- **cas 1: $N \geq 4 \text{ à } 5 \times T \Rightarrow i_{\max}(T, \Delta t)$ obtenue par extrapolation de la courbe empirique**
- **cas 2: $N < 4 \text{ à } 5 \times T \Rightarrow$ ajuster une loi de probabilité (Gumbel, lognormale, exponentielle...)**

Ex: Ajustement par une loi exponentielle

$$T(I_{\max}) = \exp((i_{\max} - \alpha)/\beta)$$



CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Courbes intensité durée fréquence

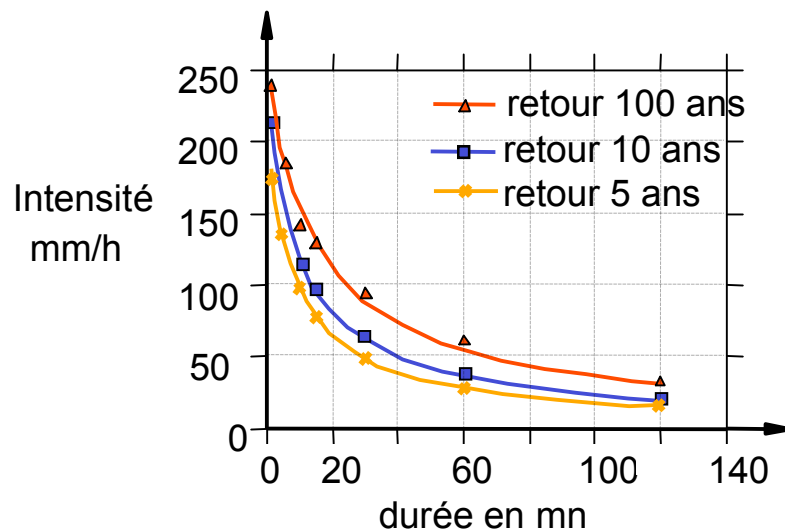
❖ Modèles mathématiques des courbes IDF

- **formule de Talbot:** $i_{\max}(T; dt) = \frac{a(T)}{b(T) + dt}$

- **formule de Montana:** $i_{\max}(T; dt) = a(T) \times dt^{b(T)}$

a, b, c: paramètres à ajuster

- **formule de Keiffer Chu:** $i_{\max}(T; dt) = \frac{a(T)}{dt^{b(T)} + c(T)}$



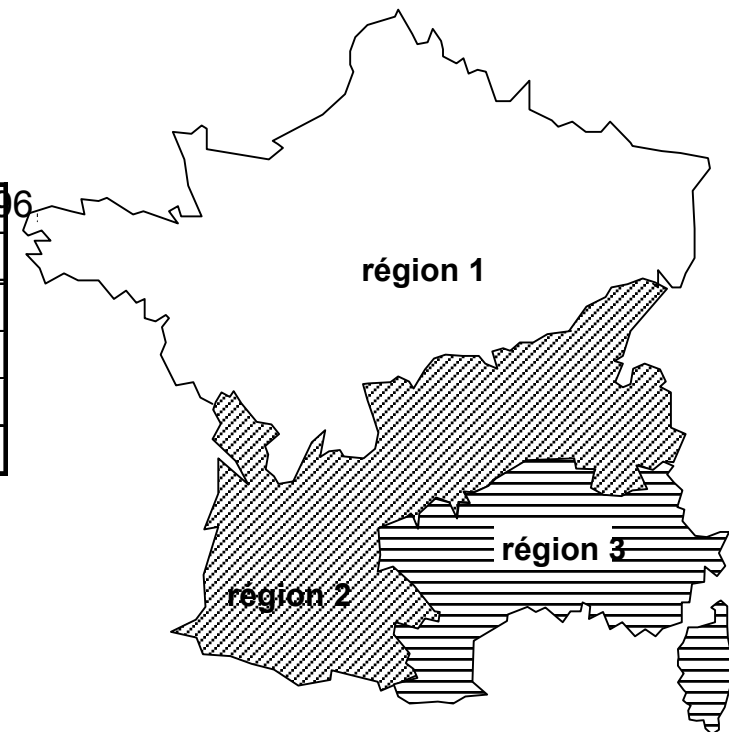
Courbes Intensité-durée-fréquence de la station de Paris-Montsouris entre 1927 et 1978 pour les périodes de retour de 5, 10 et 100 ans. Ajustements par la formule de Talbot.

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

❖ INT 77: Montana

- découpage de la France en 3 zones
- valeurs de a et b pour chaque région

Période	Région 1	Région 2	Région 3	de retour	a	b
10 ans						
5 ans						
2 ans						
1 an						
0,5 an						



$$\Rightarrow i_{\max}(T, dt) = a dt^b$$

dt en mn, $i_{\max}$ en mm/mn

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Pertes au ruissellement

- ❖ **pertes aux ruissellement = pertes initiales + pertes continues**
 - pertes initiales: mouillage des surfaces, stockage dans les dépression du sol ...
 - ⇒ **faibles si imperméabilisation >20%**
 - ⇒ **prises constantes, valeur forfaitaire (1 à 2 mm)**
 - pertes continues: évaporation, infiltration, interception par la végétation...dépend de:
 - ⇒ **occupation du sol**
 - ⇒ **état initial du bassin versant**
 - ⇒ **intensité de pluie**
- ❖ **coefficient de ruissellement = modèle simple de calcul des pertes**
 - $C_{ruis} = (\text{volume de pluie net}) / (\text{volume de pluie brute})$
 - approximation $C_{ruis} \approx \text{Coefficient d'impermeabilisation}$

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Modèle de pertes au ruissellement

❖ valeurs types de coefficient de ruissellement

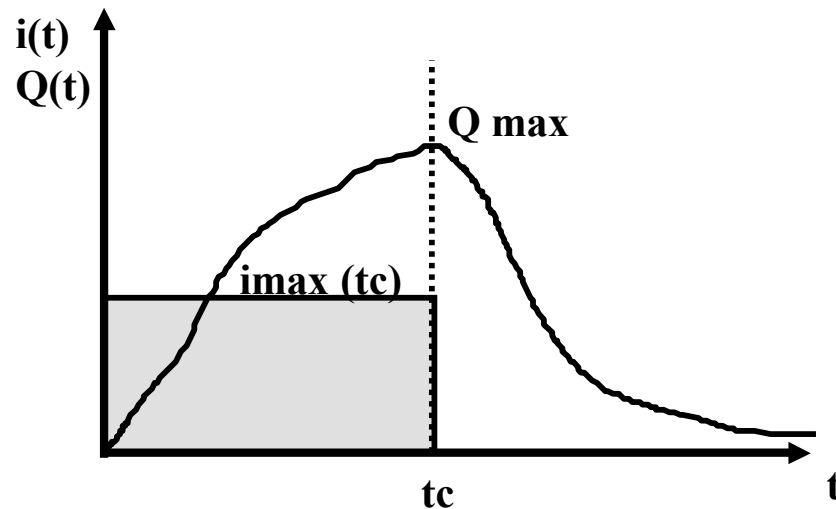
- selon type d 'habitat (CG 1333)
 - ⇒ centre ville: 0.7 à 0.9
 - ⇒ pavillons groupés: 0.6 à 0.75
 - ⇒ pavillons isolés: 0.3 à 0.5
- selon type de surface
 - ⇒ toits, rues: 0.9
 - ⇒ pavage: 0.6
 - ⇒ allées en graviers: 0.2
 - ⇒ jardins: 0.1

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Méthode Rationnelle

$$Q_p(T) = 10 \times C \times i_{\max}(T; t_c) \times A$$

- $Q_p(T)$ = débit de pointe de temps de retour T (m³/h)
- $i_{\max}(T; t_c)$ = intensité moyenne maximale de période de retour T sur la durée du temps de concentration (mm/h)
- C = coefficient de ruissellement
- A = surface du bassin versant (ha)



Hypothèses

- $Q_p(T)$ est observé ssi durée pluie $\geq t_c$
- $Q_p(T)$ proportionnel à $I_{\max}(T)$
- Q_p et $I_{\max}$ ont le même temps de retour

Conditions d'utilisation

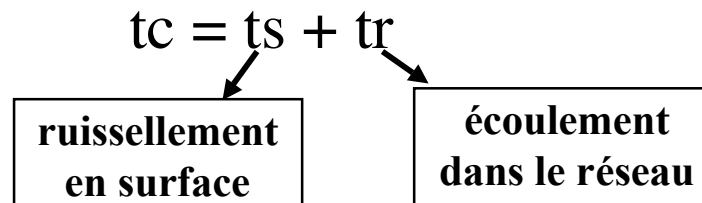
BV de caractéristiques homogènes
→ BV de petite taille

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Méthode Rationnelle

Inconvénients de la méthode

❖ Calcul malaisé de t_c :



Estimation de t_s

- formules empiriques

ex: $t_s = 1.92 L^{0.32} i^{-0.64} I^{-0.45}$

- estimations forfaitaires pour BV à faible pente:

habitat très dense: 5 mn

habitat dense: 10 à 15 mn

habitat lache: 20 à 30 mn

Estimation de t_r

- par itérations à partir du calcul de Q_p

❖ Ne tient pas compte de l'effet de stockage

❖ Ne tient pas compte de la variabilité spatiale des pluies

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Méthode superficielle de Caquot

$$\underbrace{\text{volume pluie nette pendant } t_c}_{\alpha} = \underbrace{\text{volume écoulé à l'exutoire}}_{\delta} + \underbrace{\text{volume stocké}}_{\beta}$$

- A surface (en ha)
- α coef d'abattement spatial de la pluie

$$\alpha = A^{-\varepsilon}$$

- $H = i_{\max}(T; t_c) \times t_c = a \times t_c^{b+1}$ (en mm)

- Q_p débit de pointe de période de retour t_c

- t_c temps de concentration

$$t_c = \mu I^c A^d Q_p^f$$

- I pente moyenne hydraulique du réseau d'écoulement (en m/m)

D'où la formule de Caquot

$$Q_p = \left[\frac{a \mu^b}{6(\beta + \delta)} \right]^{\left[\frac{1}{1-bf} \right]} \times I^{\left[\frac{bc}{1-bf} \right]} \times C^{\left[\frac{1}{1-bf} \right]} \times A^{\left[\frac{bd-\varepsilon+1}{1-bf} \right]}$$

Valeur des coef numériques: $\mu=0.5$ $c=-0.41$ $d=0.507$ $f=-0.287$ $\varepsilon=0.05$ $\beta + \delta = 1.1$

© 2004 Blackwell Publishing Ltd *Journal of Internal Medicine* 255: 105–112

	Formulaire de CAQ		Période de retour Ta (T)	b (T)	Qp(
					A
					C
					p
					M
					S
					c
					Q
					o

Ces formules sont établies pour un allongement $M=L/\sqrt{A}=2$

$$Q_{p'} = Q_p \times m \text{ avec}$$

$$m = \left(\frac{M}{2} \right)^{\frac{0.84b(T)}{1-0.29b(T)}}$$

ou

$$m = \left(\frac{M}{2} \right)^{0.7b(T)}$$

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

Domaine de validité de la formule superficielle de CAQUOT

$$\begin{aligned} A &\leq 200 \text{ ha} \\ C &\geq 0.2 \\ 0.002 &\leq I \leq 0.05 \end{aligned}$$

Condition d'utilisation

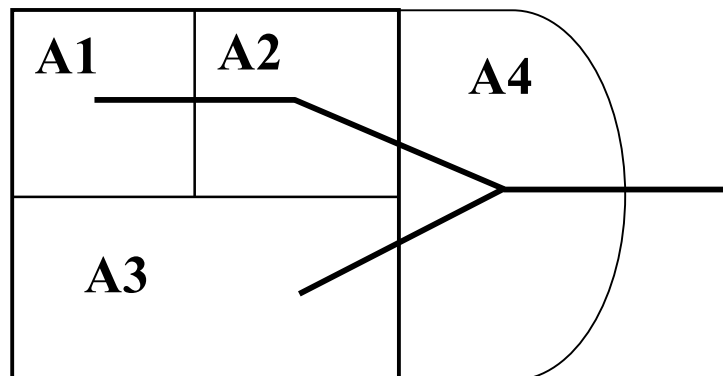
bassins versants élémentaires de pente et de coefficient de ruissellement homogène

CALCUL DU DEBIT D'EAUX PLUVIALES

❖ Calcul des caractéristiques d'un bassin versant équivalent

- Assemblage de bassins versant, en série ou en parallèle

Paramètres équivalents	A eq	C eq	I eq	M eq	Bassins en série	Aj
	Σ	$\frac{\Sigma A_j C_j}{\Sigma A_j}$	$\left[\frac{\Sigma L_j}{\Sigma \left(\frac{L_j}{\sqrt{I_j}} \right)} \right]^2$			$\frac{\Sigma L_j}{\sqrt{\Sigma A_j}}$
	Σ	$\frac{\Sigma A_j C_j}{\Sigma A_j}$	$\frac{\Sigma (I_j \times Q_{pj})}{\Sigma Q_{pj}}$			$\frac{L(Q_{pj \max})}{\sqrt{\Sigma A_j}}$



DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

Hypothèses sur les conditions d'écoulement:
régime permanent et uniforme

Calcul des sections d'écoulement:

❖ **Dans ces conditions on a** (formule de Chezy):

$$V = C\sqrt{R_H I}$$

$$Q = VS = CS\sqrt{R_H I}$$

- R_H rayon hydraulique
- S section mouillée
- V vitesse moyenne dans la section
- C coefficient de Chezy
- I pente (m/m)

Evaluation de C :

- $C = K_R R_H^{1/6}$ (Manning-Strickler)

- $C = \frac{87\sqrt{R_H}}{\gamma + \sqrt{R_H}}$ (Bazin)

DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

Valeurs des coefficients K (Manning-Strickler) et γ (Bazin)

Nature de la paroi	K	Revêtement lisse	1000.06	Béton	600.16

Selon l'INT 77

- ❖ Réseaux **eaux usées** en système séparatif: $\gamma = 0.25$ $V = 70 R_H^{2/3} I^{1/2}$
- ❖ Réseaux **unitaires ou pluviaux** séparatifs: $\gamma = 0.46$ $V = 60 R_H^{3/4} I^{1/2}$
- ❖ Pour les canalisations standards utilisation des **abaques**

DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

Contraintes dans le tracé du réseau

- ❖ suivre autant que possible plan de la voirie
 - ❖ distance max entre 2 regards de visite: 70m
 - ❖ regard de visite aux changements de pente et de direction
 - ❖ couverture minimale des canalisations: 80 cm
 - ❖ suivre si possible la pente naturelle
 - ❖ pente minimale:
 - 2 mm/m pour les eaux usées
 - 4 mm/m pour les eaux pluviales
 - ❖ diamètre minimal:
 - eaux usées $\varnothing$ 200
 - pluvial ou unitaire $\varnothing$ 300
- ⌘ diamètres croissants d'amont en aval

DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

Vitesse maximale admissible:

4 m/s (éviter abrasion du tuyau)

Vitesses minimales d'autocurage:

- si $V < 0.6$ m/s dépôt des sables
- si $V < 0.3$ m/s dépôt des vases organiques

❖ Réseau pluvial ou unitaire:

⇒ $V \geq 0.6$ m/s pour $Q = 0.1$ Qps

🍏 $V \geq 0.3$ m/s pour $Q = 0.01$ Qps

⌘ Réseau eaux usées

🍏 $V > 0.5$ à 0.7 m/s à pleine section ou demi section

🍏 $V \geq 0.3$ m/s pour $h = 2/10 \text{ Ø}$ c.à.d. $Q \geq 0.1$ Qps

🍏 $h \geq 2/10 \text{ Ø}$ pour débit moyen actuel

DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

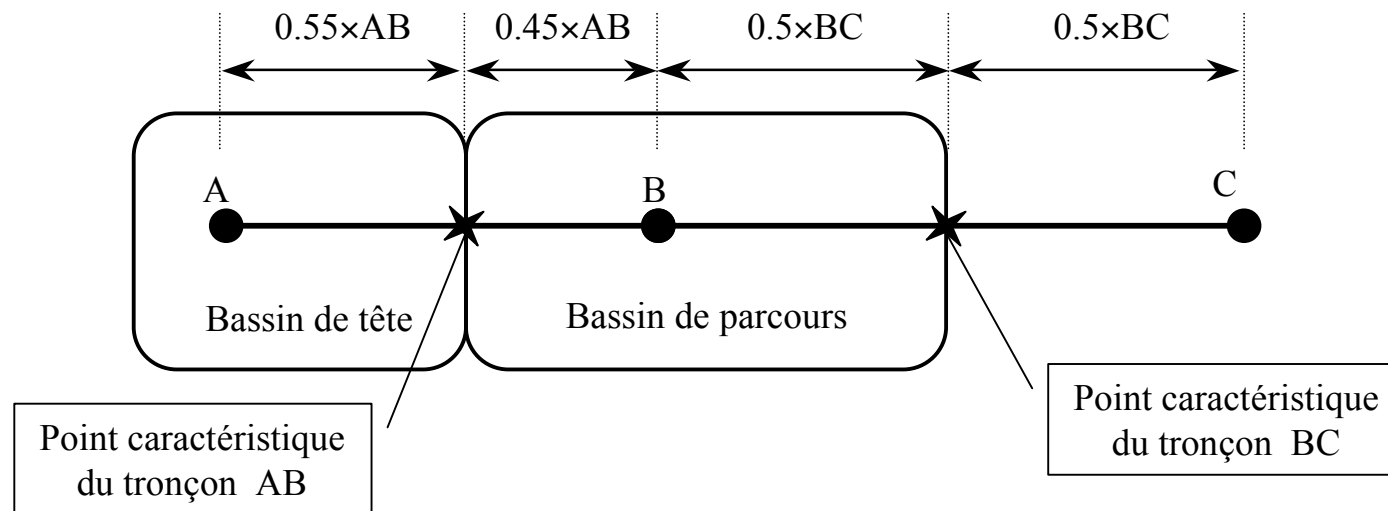
- ❖ Découper le réseau en tronçons de ≈ 300 m, définir le point caractéristique
- ❖ Délimiter le bassin versant drainé au point caractéristique et calculer le débit de pointe
- ❖ Calculer le diamètre de canalisation permettant de faire passer ce débit, compte tenu de la pente
 - ⇒ choix de la pente: en fonction des contraintes de pose (le plus près de la pente naturelle, en respectant la couverture minimale, la profondeur minimale de desserte des habitations, la pente minimale et en évitant le substratum rocheux)
- ❖ Tracé du profil en long et calcul de la ligne piézométrique
 - ⇒ toujours partir de l'aval (niveau piézométrique imposé à l'aval) et remonter vers l'amont
 - si écoulement gravitaire: pente piézométrique = pente du radier ($i=I$)
 - si écoulement en charge: $i = (V_{ps}/(60R_{Hps}^{0.75}))^2$
- ❖ Réajuster pente et diamètre, tracer le profil en long final

DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

❖ Définition du point caractéristique

Point caractéristique = point où on calcule le débit

Position: à une distance de $\frac{5}{9} L$ de l'amont du tronçon L



DIMENSIONNEMENT DU RESEAU

Calcul de l'écoulement

après avoir défini profil en plan et en profil du réseau, vérifier:

- fonctionnement lorsque zones seront complètement urbanisées
- fonctionnement intermédiaire aux différentes étapes du développement

MODELISATION DYNAMIQUE DES RESEAUX

Modèle hydrodynamique (hydrologique + hydraulique)

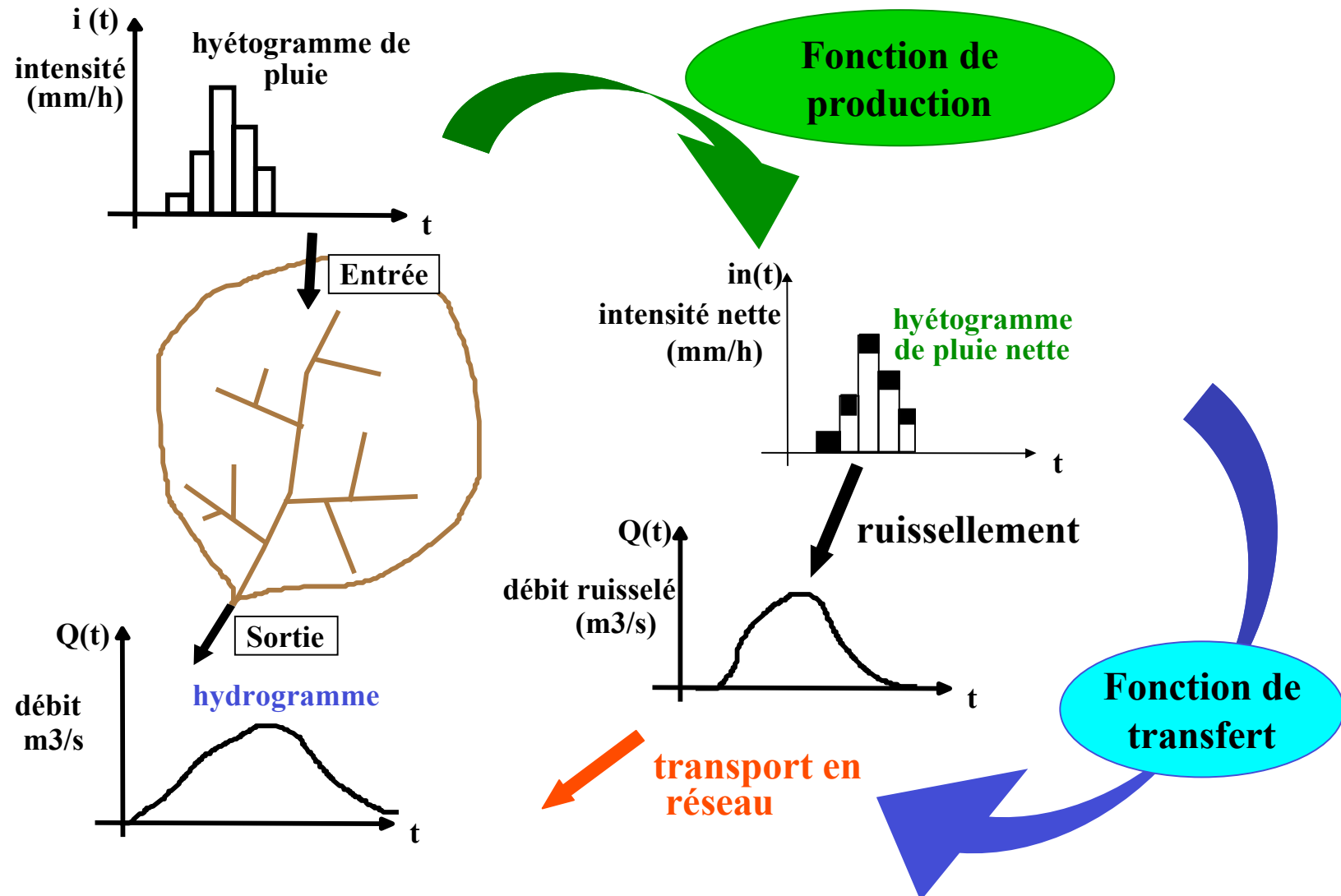
Usage

- dimensionnement de réseau
- diagnostique de réseau
- *qualité des eaux*

Intérêt

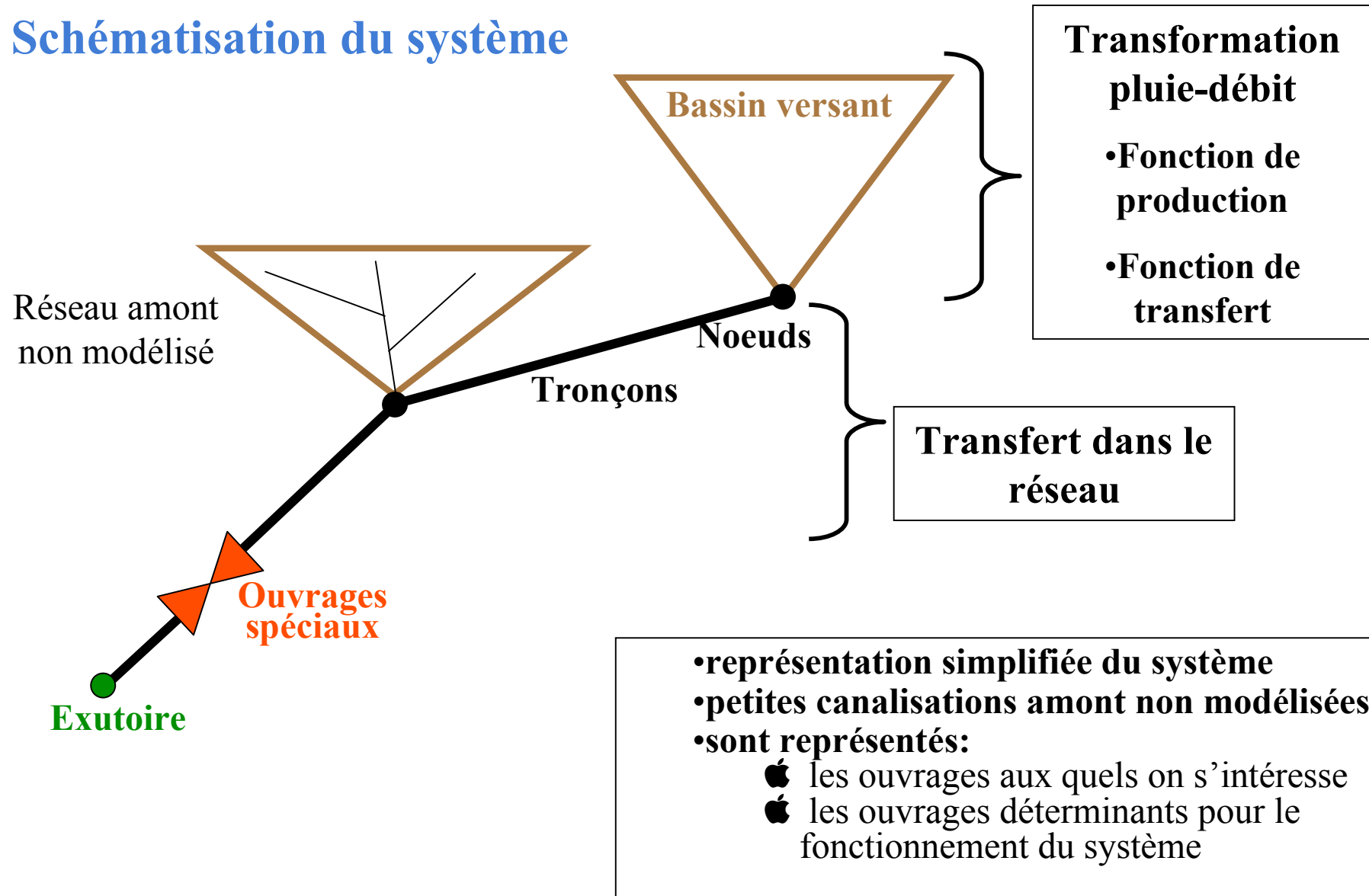
- calcul dynamique (hydrogrammes)
- grand bassins versants
- fonctionnement de réseaux complexes (influences de l'aval, maillages, déversoirs, ouvrages spéciaux...)

MODELISATION DYNAMIQUE



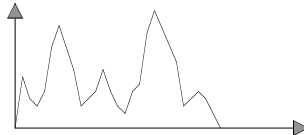
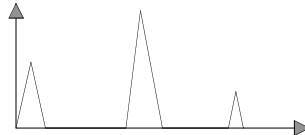
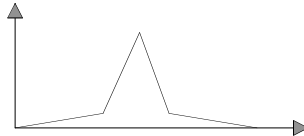
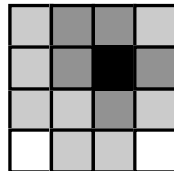
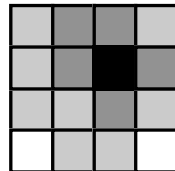
MODELISATION DYNAMIQUE

Schématisation du système



MODELISATION DYNAMIQUE

Modèles de pluies

pluie isolée chronique de pluies		Pluies réelles	Pluies ponctuelles	Pluies de projet	Evénements 3D
					
					
					

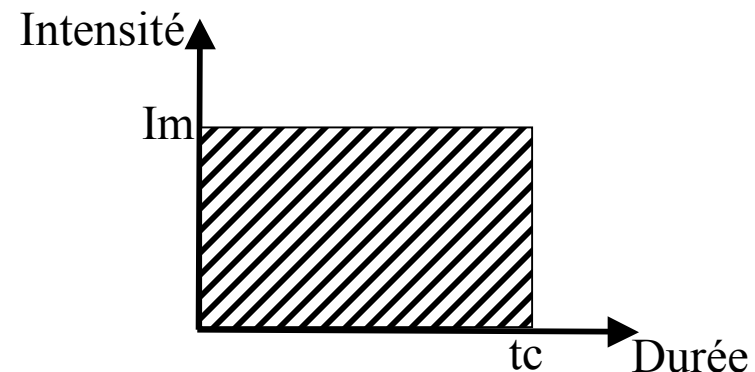
MODELISATION DYNAMIQUE

Pluie de projet =

- pluie synthétique
- de forme simple
- intégrant les statistiques pluviométriques
- produisant à l'exutoire du BV le même effet qu'une pluie réelle

❖ Hyetogramme unitaire

$$I_m = I_{\max}(T, \Delta t = t_c)$$



MODELISATION DYNAMIQUE

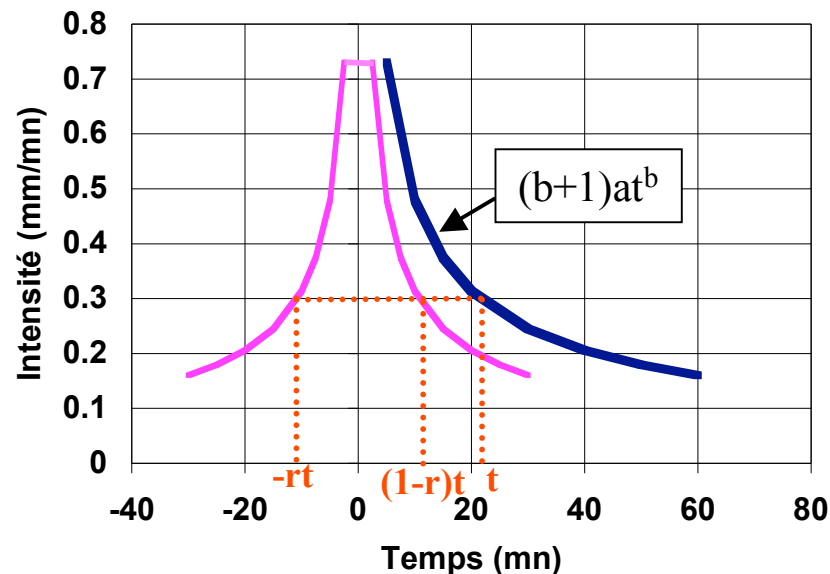
Pluie de projet

❖ Pluie de projet de Keiffer et Chu

⇒ tirée du modèle HDF de Keiffer $H(T, \Delta t) = I_{\max}(\Delta t) \times \Delta t$,
avec Montana $H(T, \Delta t) = a(T) \Delta t^{b(T)+1}$

⇒ intensité instantanée: $i(t) = dH/dt$
avec Montana $i(t) = (b+1) a t^b$

⇒ maximum d'intensité au centre de l'averse



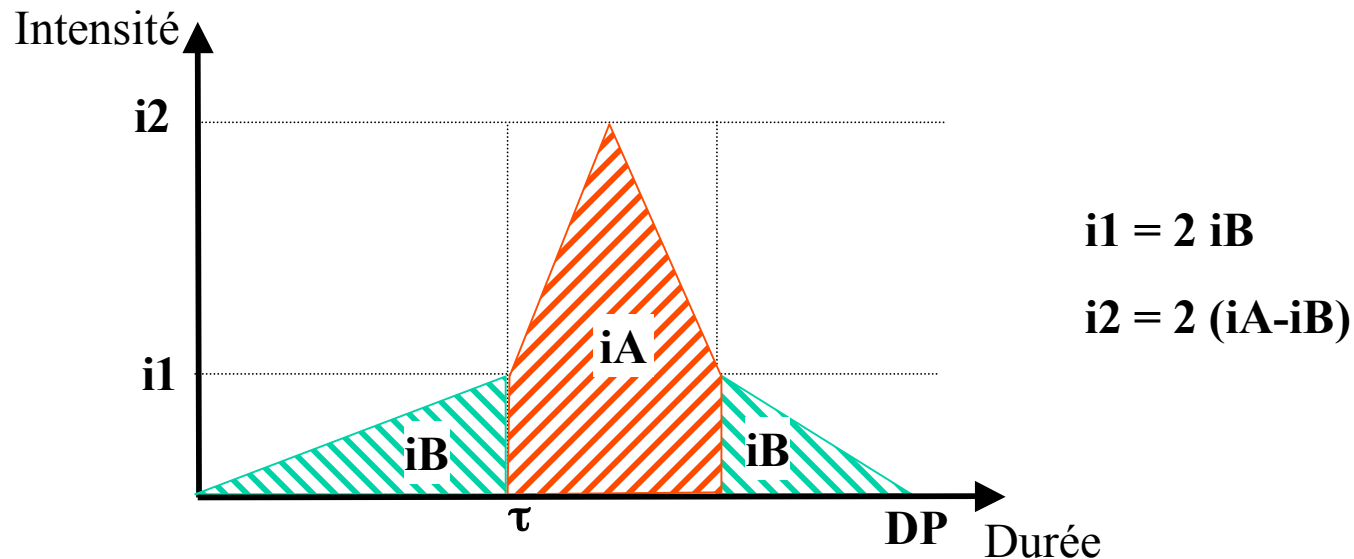
Problème:
conduit à surestimer
débit max et volume

MODELISATION DYNAMIQUE

Pluie de projet

❖ Pluie de projet double triangle (Desbordes)

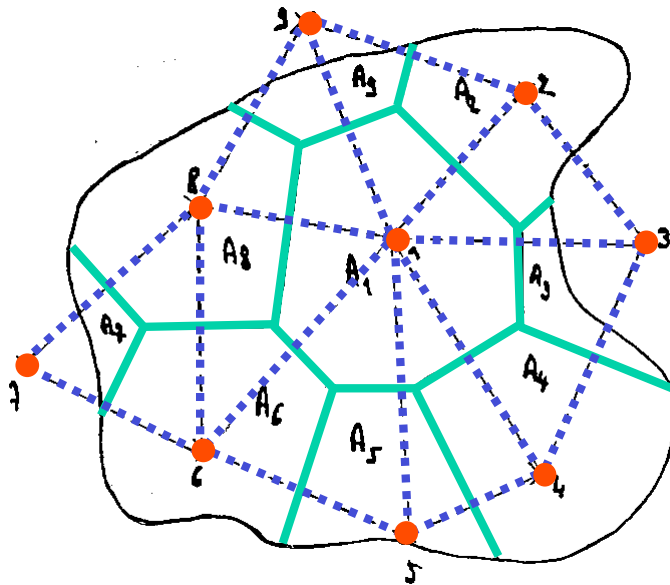
- ⇒ durée totale DP ($\approx 4h$)
- ⇒ phase intense, durée DM ($=15mn$ à $1h$), intensité moyenne $iA = I_{max}(T, DM)$
- ⇒ phase peu intense, durée DP-DM, intensité moyenne $iB = I_{max}(T', DP-DM)$
- ⇒ T = période de retour de dimensionnement ($T=10ans$)
- ⇒ T' = période de retour phase peu intense, $T' < T$ (3 à 4 ans)
- ⇒ position phase intense: $\tau = \theta$ (DP-DM)



MODELISATION DYNAMIQUE

Prise en compte de la distribution spatiale des pluies

❖ Méthode des polygones de THIESSEN



Exp: Calcul de la hauteur d'eau moyenne sur l'ensemble du bassin versant

N = nombre de stations de mesure

A = surface totale du bassin versant

A_i = surface du polygone de la station **i**

H_i = hauteur d'eau à la station **i**

Hauteur moyenne sur le BV:

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A} \times H_i$$

MODELISATION DYNAMIQUE

Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies

❖ Pluies orageuses, petits bassins versants...

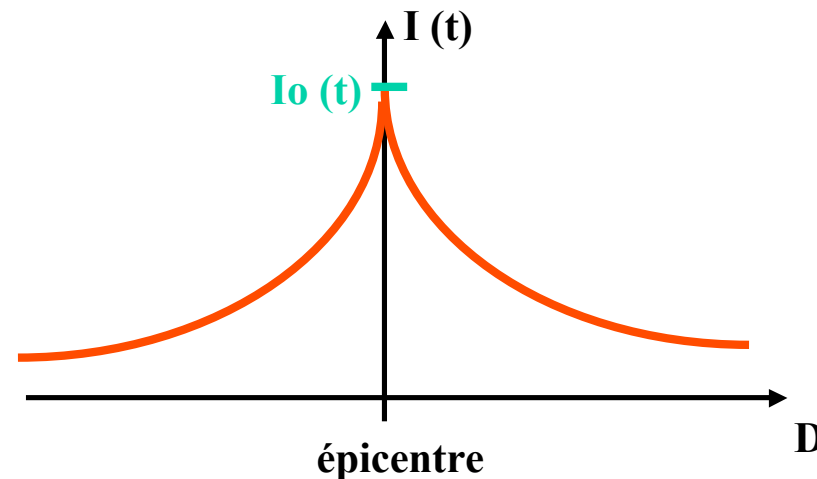
⇒ modèles simplifiés de distribution spatiale

⇒ coefficient d'abatement en fonction de la distance à l'épicentre

$$I(D,t) = a(D,t) \times I_0(t)$$

$I_0(t)$ = intensité à l'épicentre

D = distance à l'épicentre (m)



exemple: formule de Fruhling $i(t) = i_0(t) (1 - \alpha \sqrt{D})$

α = coef de décroissance (0.006)

MODELISATION DYNAMIQUE

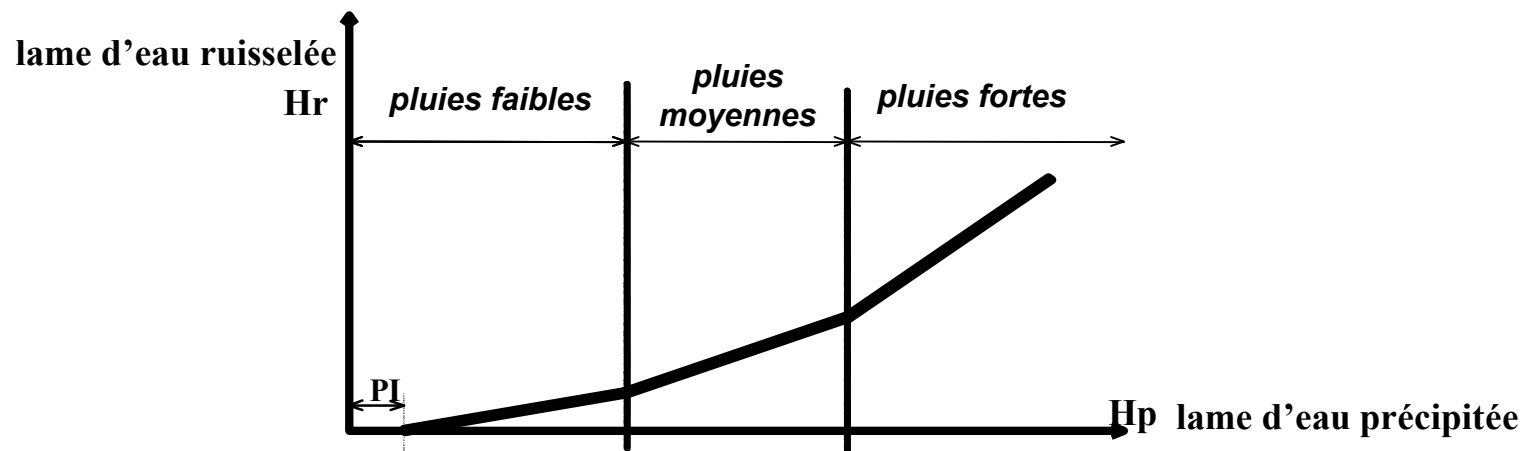
Transformation pluie-débit : fonction de production

Bassin versant urbain

❖ **Modèle de coefficient de ruissellement constant**

❖ **Modèle standard**

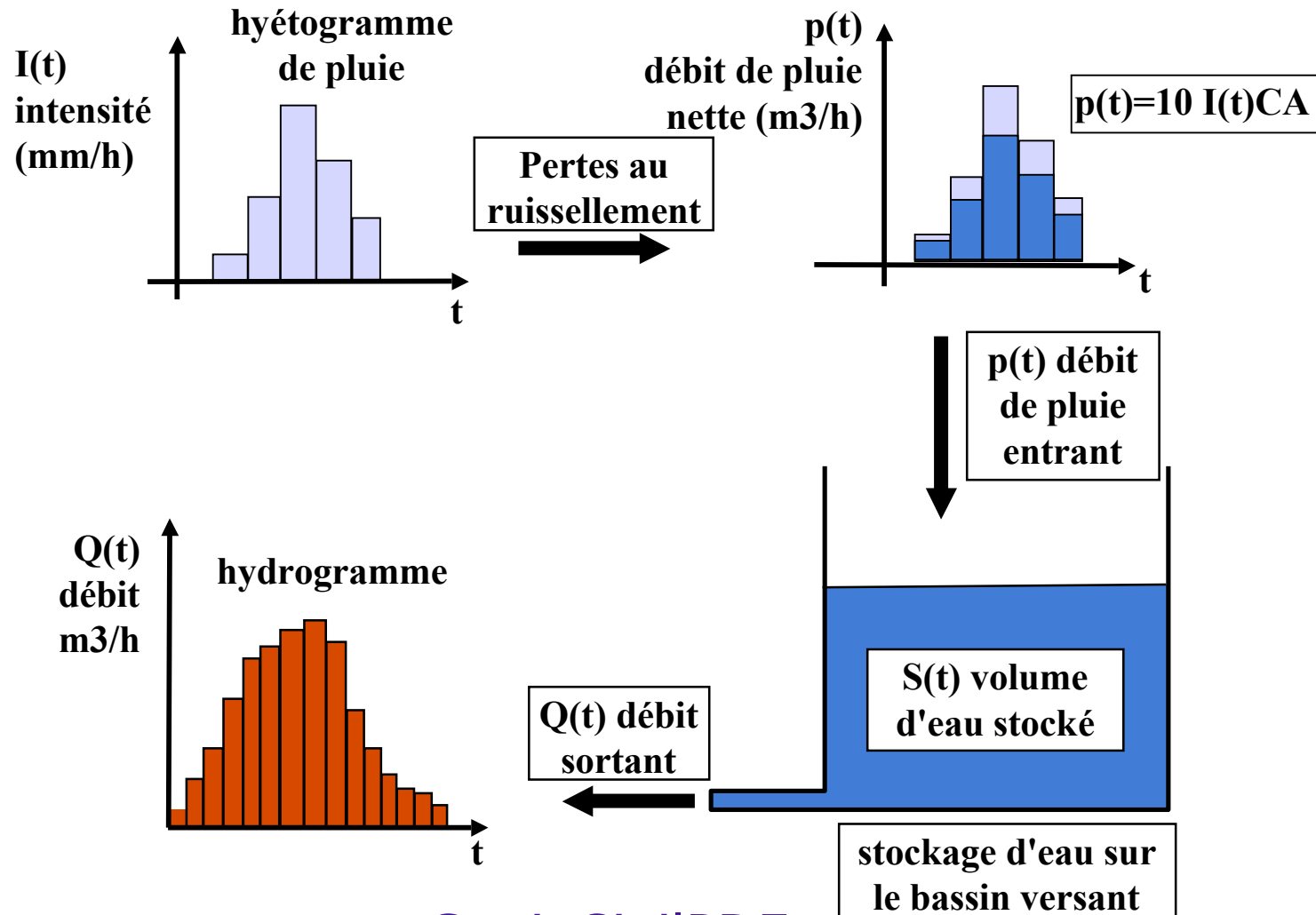
- 3 types de surfaces:
 - ⇒ surfaces imperméables connectées au réseau
 - ⇒ surfaces imperméables non directement connectées
 - ⇒ surfaces perméables
- pertes initiales + pertes continues proportionnelles à l'intensité de pluie



MODELISATION DYNAMIQUE

Transformation pluie-débit : fonction de transfert

❖ Modèle du réservoir linéaire



MODELISATION DYNAMIQUE

Transformation pluie-débit : fonction de transfert

❖ Modèle du réservoir linéaire

Principe: modèle conceptuel de réservoir

Equation de continuité: $\frac{dS(t)}{dt} = p(t) - Q(t)$

Equation de stockage: $S(t) = k Q(t)$

d'où l'équation différentielle du modèle de réservoir linéaire:

$$k \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) = p(t)$$

Solution analytique: $Q(t) = Q_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{k}} \left[1 + \frac{1}{Q_0 k} \int_{t_0}^t p(\tau) e^{\frac{(\tau-t_0)}{k}} d\tau \right]$

Solution discrète:

$$Q(t + \Delta t) = Q(t) e^{-\frac{\Delta t}{k}} + (1 - e^{-\frac{\Delta t}{k}}) p(t + \Delta t)$$

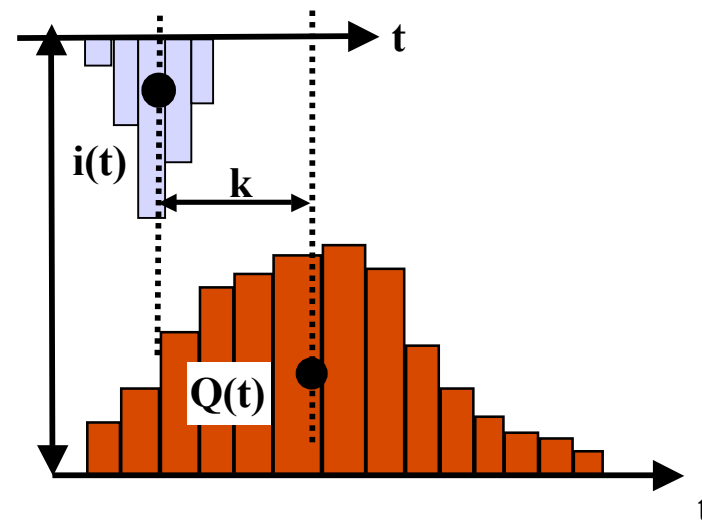
MODELISATION DYNAMIQUE

Modèle du réservoir linéaire

Ajustement du paramètre k:

k = « lag time » ou « temps de réponse »

= temps de décalage entre le centre gravité
du hiétogramme de pluie et le centre de
gravité de l'hydrogramme des débits



- ❖ Calage, à partir de mesures simultanées de $i(t)$ et $Q(t)$
- ❖ Formule empiriques

ex: formule de Desbordes, cas de la pluie de projet double triangle

$$K = 5.07 A^{0.18} P^{-0.36} (1+C)^{-1.9} L^{0.15} DM^{0.21} HM^{-0.07}$$

MODELISATION DYNAMIQUE



Fonction de transfert

- ❖ Réservoir linéaire
- ❖ Cascade de réservoirs linéaires identiques

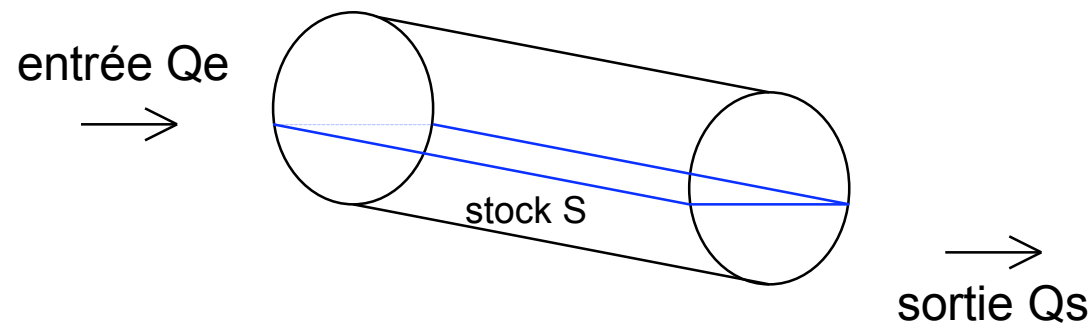
Choisir toujours le modèle le plus simple

MODELISATION DYNAMIQUE

Modélisation du transfert dans le réseau

❖ Modèle conceptuel: MUSKINGUM

transfert d'une onde amortie et décalée dans le temps



Equation de continuité $dS/dt = Q_e - Q_s$

Équation de stockage: $S = K.[a.Q_e + (1 - a).Q_s]$

K et a paramètres de calages

MODELISATION DYNAMIQUE

Modélisation du transfert dans le réseau

❖Modèle conceptuel: MUSKINGUM

- Intérêt:
 - ⇒ rapidité de calcul
 - ⇒ bonne reproduction des débits à l'exutoire dans la plupart des cas
- Limitations:
 - ⇒ pas de propagation des mises en charge vers l'amont
 - ⇒ pas de prise en compte des influences aval
- Précautions:
 - ⇒ grande sensibilité au choix des pas d'espace et des pas de temps de calcul
 $\Delta x = 100 \text{ à } 300 \text{ m}$, $\Delta t = 3 \text{ à } 6 \text{ mn}$
 - ⇒ insuffisant pour la modélisation de réseaux complexes (maillages), en charge ou sous influences aval

MODELISATION DYNAMIQUE

Modélisation du transfert dans le réseau

- ❖ **Modèle physique: Barré de Saint Venant**
formes simplifiées de BSV

Hypothèses de Barré de Saint Venant

- ⇒ écoulement à surface libre
- ⇒ écoulement unidimensionnel
- ⇒ écoulement graduellement varié
 - **répartition hydrostatique des pression**
 - **pente longitudinale faible**
 - **effet du frottement proche de ce qu'il est en régime uniforme**
- ⇒ densité constante

MODELISATION DYNAMIQUE

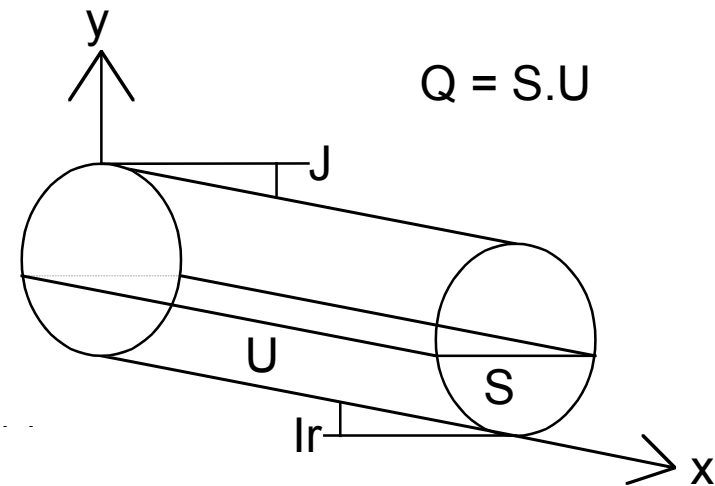
Modélisation du transfert dans le réseau

❖ Système de Barré de Saint Venant

équation de continuité

équation dynamique

(1) (2) (3) (4) (5)



chaque terme correspond à une pente (perte d'énergie)

(1) et (2) : termes d'inertie (accélération de l'écoulement et variation spatiale de vitesse)

(3): terme de pression (pente de la surface libre)

(4): terme de gravité (pente du fond)

(5): terme de pertes de charges par frottement (pente de la ligne d'énergie)

MODELISATION DYNAMIQUE

Modélisation du transfert dans le réseau

❖ Système de Barré de Saint Venant

Méthode de résolution dans CANOE:

méthode implicite de différences finies (schéma de Preismann)

Contraintes:

- définition des conditions initiales
- définition des conditions aux limites (amont et aval)
- éviter les tronçons à très forte pente
- adoucir les accidents structurels (cassures de pente, coude...)

Inconvénient:

temps de calcul

convergence et stabilité des calculs

Intérêt:

simulation de réseaux au fonctionnement complexe

simulation correcte des lignes piézométriques

MODELISATION DYNAMIQUE

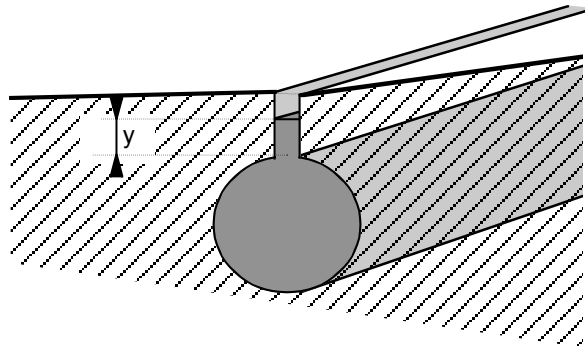
Modélisation du transfert dans le réseau

❖ Traitement des mises en charge

Muskingum: méthodes approximatives

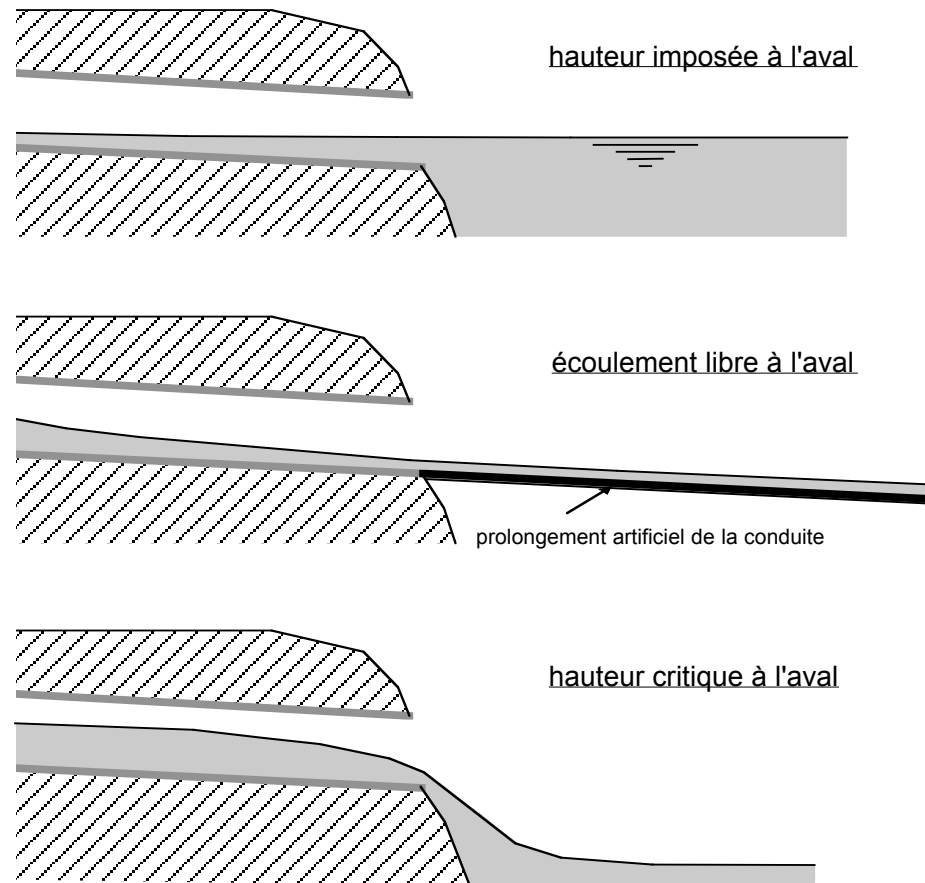
- avec écrêtement des débits (Q excédentaire stocké puis restitué plus tard)
- sans écrêtement des débits

Barré Saint Venant: fente de Preismann



MODELISATION DYNAMIQUE

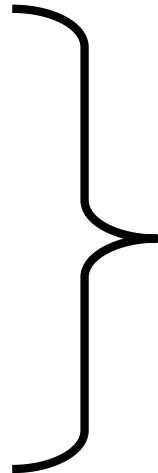
Modélisation de l'exutoire



MODELISATION DYNAMIQUE

Modélisation d'ouvrages spéciaux

**bassins de retenue
déversoirs
seuils
siphons
orifices
stations de pompage
régulateur de débit
...**



**Modèles spécifiques
Description simplifiée**

MODELISATION DYNAMIQUE

Calage et validation du modèle

Calage = nécessité car système imparfaitement connus

❖ **Calage du volume:**

- paramètres de la fonction de production
 - ⇒ pertes initiales
 - ⇒ pertes continues

❖ **Calage de la forme de l'hydrogramme**

- paramètres des fonctions de transfert
 - ⇒ sur les bassins versants: K lagtime
 - ⇒ dans le réseau: coef de rugosité

Validation = vérification à partir d 'un jeu de données qui n 'a pas servi au calage

⇒ Nécessite d 'avoir des données mesurées