

Journée technique d'information et  
d'échanges « Eau et urbanisme »  
Le Bourget-du-Lac 11 déc. 2013

**Le CYCLE DE L'EAU DANS LA VILLE**

**SES PERTURBATIONS**

**LES TECHNIQUES DE RÉDUCTION DES IMPACTS**

Jean-Paul BRAVARD  
Pr émérite, Université Lyon 2

# Plan en 2 parties

- Quelques exemples de réalisations
- Formalisation théorique

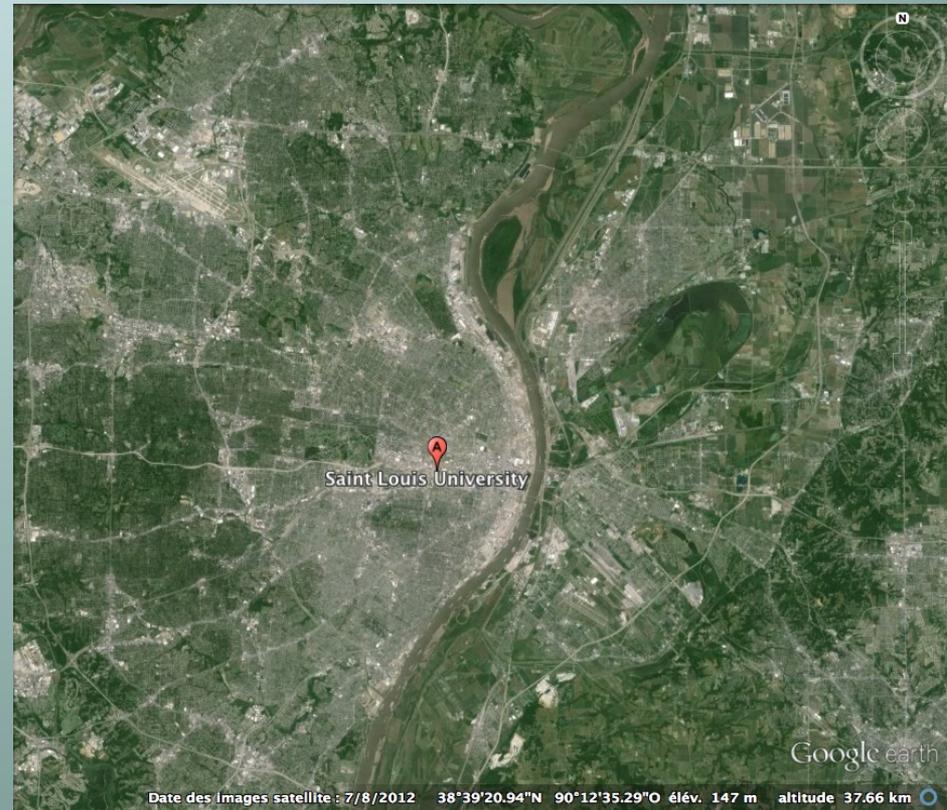
# Ex: Saint-Louis

Augmentation de la fréquence des orages estivaux de + 25 mm (+ 80%)

Orages plutôt en fin d'après-midi

Réduction du nombre de petits orages

P total augmente de 30 %



# EST LYONNAIS

DRAINAGE DES EAUX DE SURFACE DANS LA NAPPE DE  
GRAVIERS FLUVIO-GLACIAIRE







# TGV-MÉDITERRANÉE

DRAINAGE DES EAUX EXCÉDENTAIRES  
ET EFFET SUR LA VEAUNE





# VALESCURE (Saint-Raphaël, 83)

DRAINAGE DE LOTISSEMENT ET LAC DES DAMES

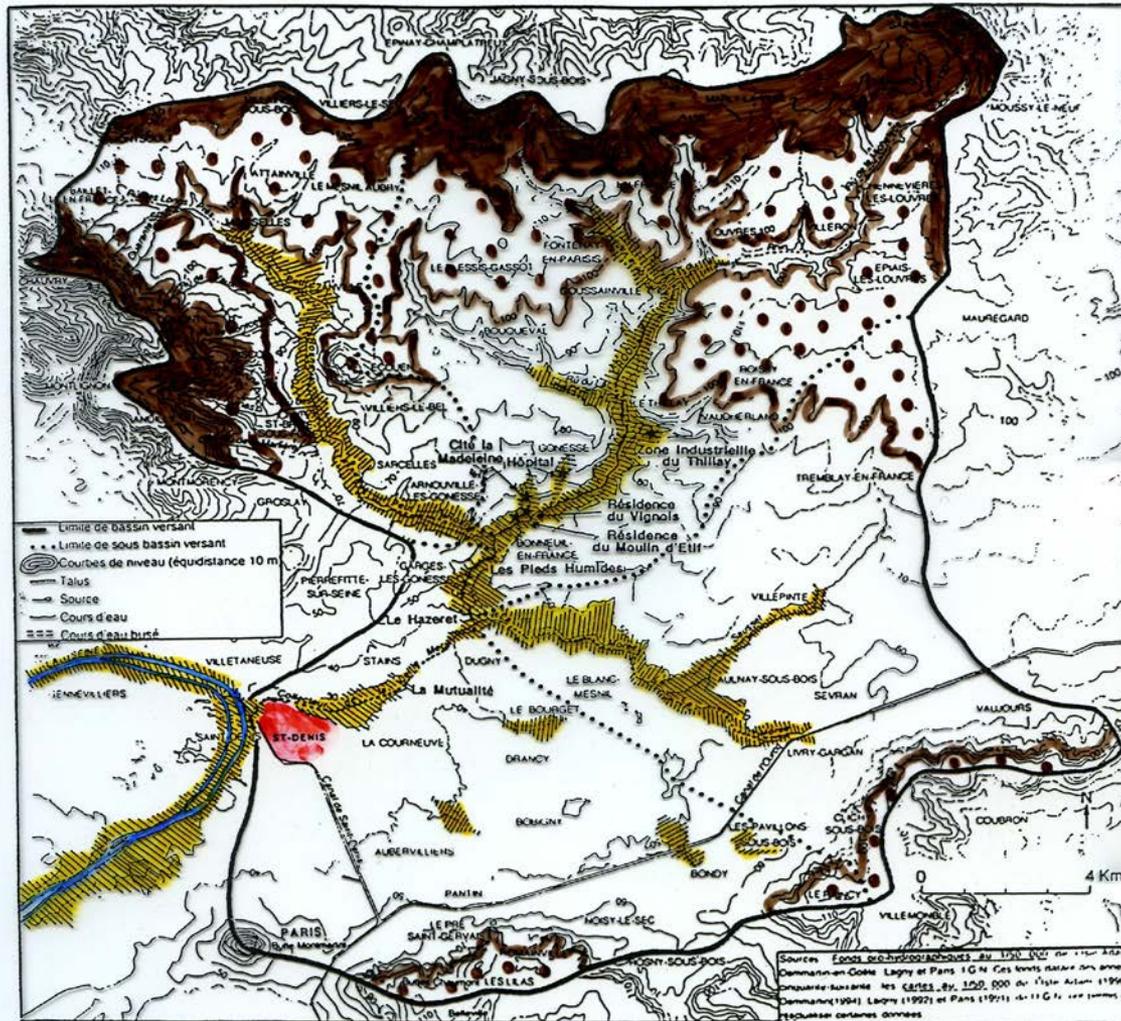




# SEINE-SAINT-DENIS

L'ACCROISSEMENT DES DÉBITS DE CRUE DANS LE BASSIN DU  
CROULT/PETIT-ROSNE

ZONE INONDABLE DU CROULT ET DE SES AFFLUENTS



- ▨ Zone inondable
- ★ Quartier ou bâtiment particulièrement exposé

Source: Emmanuelle Tardy

Carte réalisée à partir des informations fournies par la D.D.E.-S.A.R. de Gonesse et la D.E.A. de Rosny-sous-Bois.

Banlieue parisienne: la pluie de référence P10 = 40 mm en 1h

Ex: Seine-Saint-Denis.

Pour P10,  $R_{\text{ruissellement}} = 3,2 \text{ hm}^3$ , soit + 33% en 20 ans

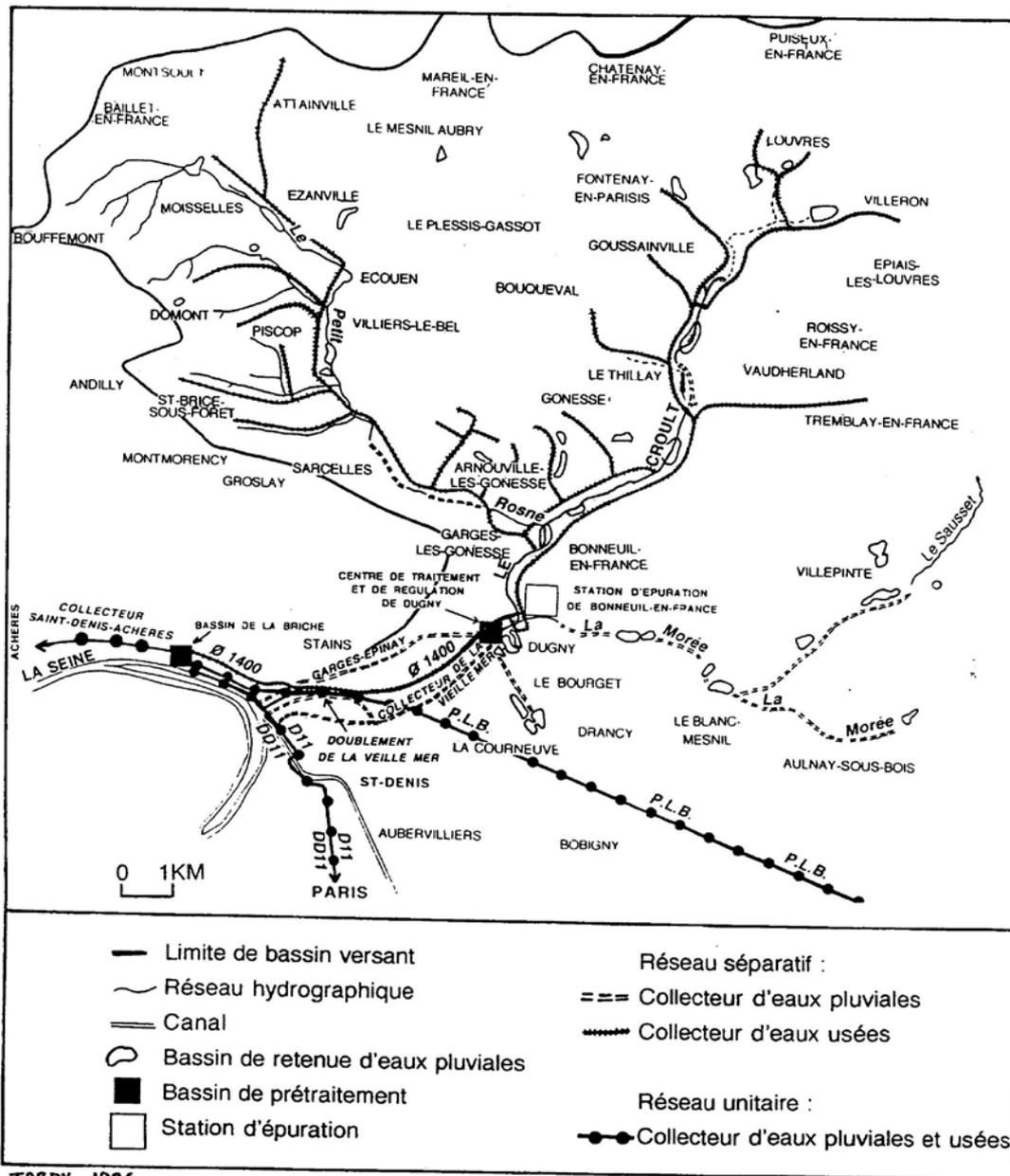
Les rivières écoulent 0,6-0,7  $\text{hm}^3$ , le stockage assuré est de 0,8  $\text{hm}^3$ . Total = 1,5  $\text{hm}^3$  >> - 50% de  $R_{\text{ruissellement}}$  sont traités

Le Petit Rhosne écoule 14  $\text{m}^3/\text{s}$  lors d'un orage de 100-135 mm >inondation

>> Augmentation de la capacité de la rivière (recalibrage)

D'ici 15 ans, + 1500 ha urbanisés. Le coeff. d'apport au réseau passera de 35 > 40% (ou + 55 000  $\text{m}^3/\text{an}$ )

# ORGANISATION DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT DANS LE BASSIN DU CROULT

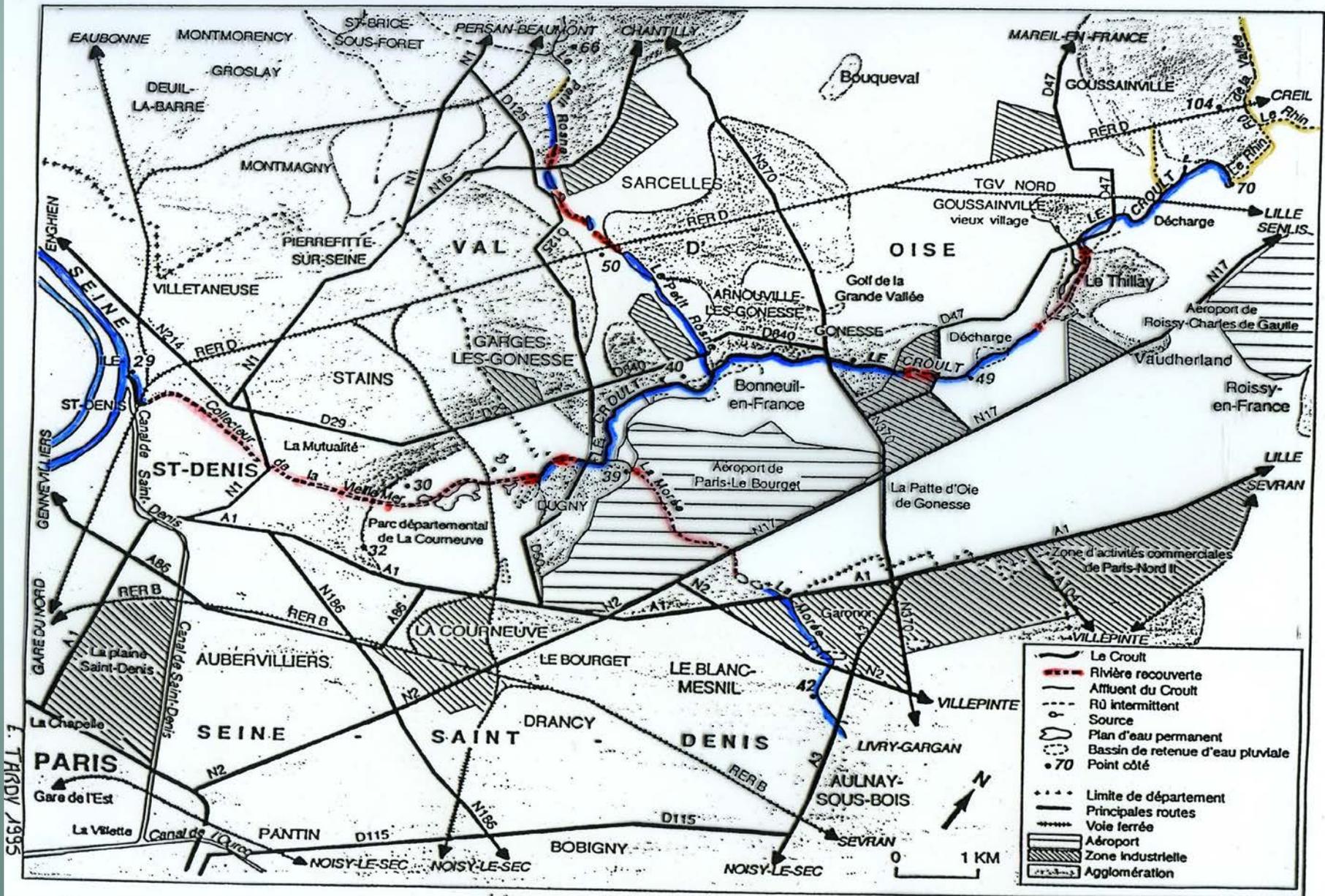


TARDY 1995.

Sources : Carte réalisée à partir des informations fournies par la D.D.E.-S.A.R. de Gonesse, la D.E.A. de Rosny-sous-Bois et le plan du réseau départemental et interdépartemental d'assainissement, conseil général de Seine-Saint-Denis, 1989.

Source: Emmanuelle Tardy

# DIVERSITE DES ESPACES TRAVERSES PAR LE CROULT



Source : cartes au 1/50 000 de l'Isle-Adam(1990), Dammartin-en-Goële (1994), Lagny (1992) et Paris (1994), I.G.N.

## A - LA VILLE ET LE CYCLE DE L'EAU (1)

### 1 - EFFET DES SURFACES URBANISÉES SUR LA PHASE ATMOSPHERIQUE DU CYCLE DE L'EAU

**Les villes augmentent P annuelles de 10% en moyenne**

- **Rugosité** créée par la ville > ascendance générale au-dessus de la ville
- Existence **d'ondes de ressaut** au-delà de la ville (ondes perpendiculaires au vent dominant, sous le vent de la ville = banlieues et cellules orageuses)
- Influence de l' **îlot de chaleur urbain**. 1) S'il est stable en situation anticyclonique > stabilité et absence de P, 2) Si la situation météo est instable (fronts froids) > l'îlot accroît l'instabilité et la convection (air réchauffé à la base) > orages
- Influence de la **pollution** par les aérosols (noyaux de condensation)



# Formalisation théorique

## **A - LA VILLE ET LE CYCLE DE L'EAU (2)**

### **2 - EFFET DES SURFACES URBANISÉES SUR L'ÉCOULEMENT DE SURFACE R (1)**

**Ecoulement  $R = R1 + R2 + R3$  où :**

R1 = augmentation de P au-dessus de la ville

R2 = augmentation de R à cause de l'imperméabilisation

R3 = apports d'eau en provenance d'autres bassins pour l'alimentation de la ville (fort si petit cours d'eau)

**Augmentation de l'écoulement total (R) de 10 à 15 % dans une grande ville.**

## 2 - EFFET DES SURFACES URBANISÉES SUR L'ÉCOULEMENT DE SURFACE R (2)

Quelles en sont **les causes de l'augmentation de l'écoulement total (R)** ?

**A - Effet R + de l'imperméabilisation (R2):**

- % de surfaces imperméables = 20 % (villas), 40-50 % (blocs d'immeubles), 90-100 % (coeur des villes)
- Coeff. de ruissellement = 0,75 pour toits, 0,80 pour voirie
- P = 1 mm produit un écoulement en ville, mais 5 mm en banlieue pavillonnaire

**B - Effet R+ par réduction globale de l'évaporation (R2)**

- **ETP+** car **chaleur+**, **surface évaporante+**
- Mais **volume d'eau évaporable-** car **R+ et infiltration-**

**C - Effet des transferts inter-bassins (R3)**

- Apport d'eau de surface ou d'eau souterraine
- Eau consommée et rejetée dans les cours d'eau

## 2 - EFFET DES SURFACES URBANISÉES SUR L'ÉCOULEMENT DE SURFACE R (2)

### Transformation de l'écoulement d'étiage (+ et -)

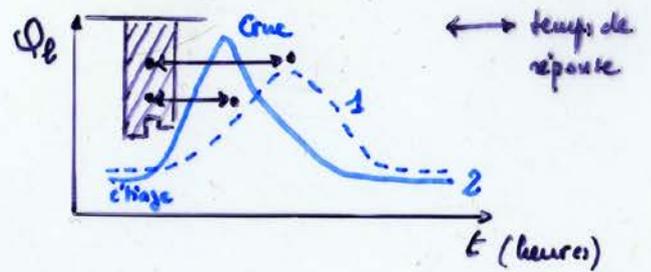
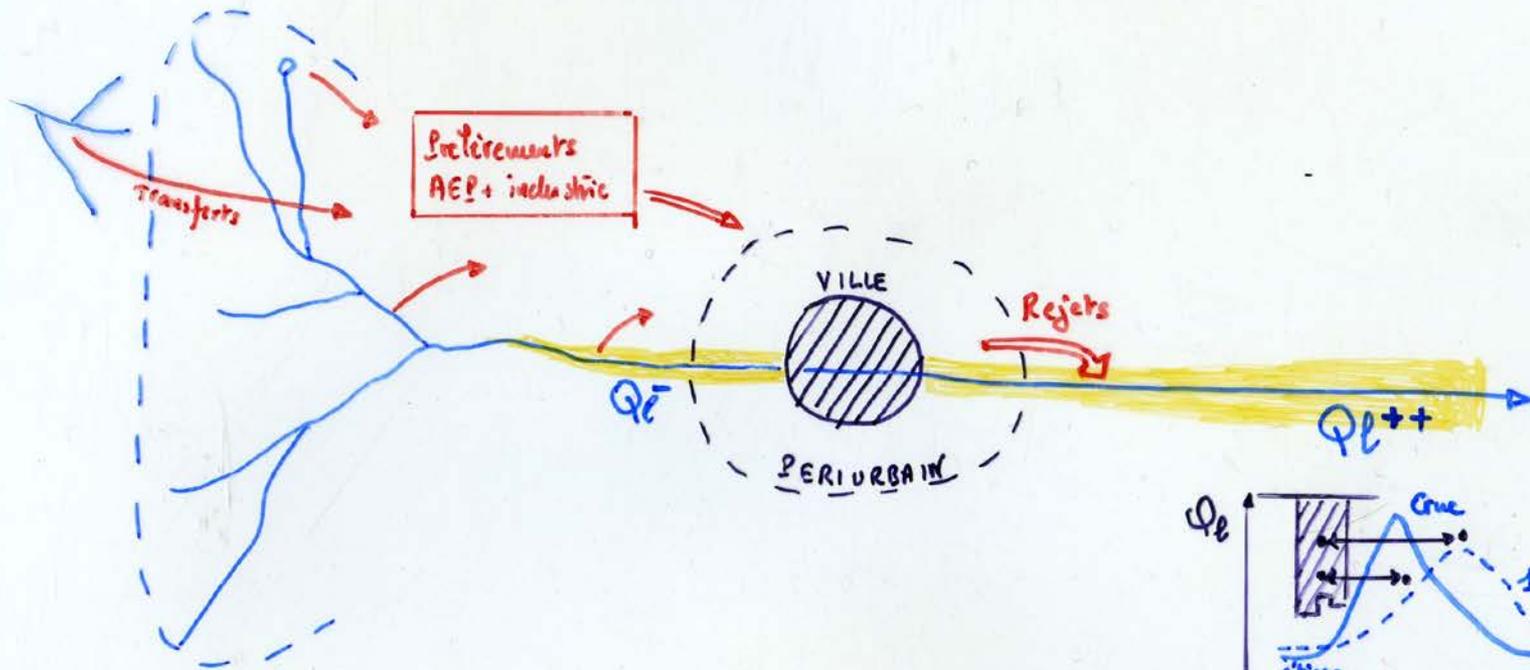
#### Effets -

- **Réduction de l'infiltration et de la recharge des nappes du fait de l'imperméabilisation**
- Abaissement de la nappe accru si emprunt pour la ville
- Rejets de neige dans les villes de haute latitude
- **Réduction des débits d'étiage des cours d'eau** si nappe abaissée

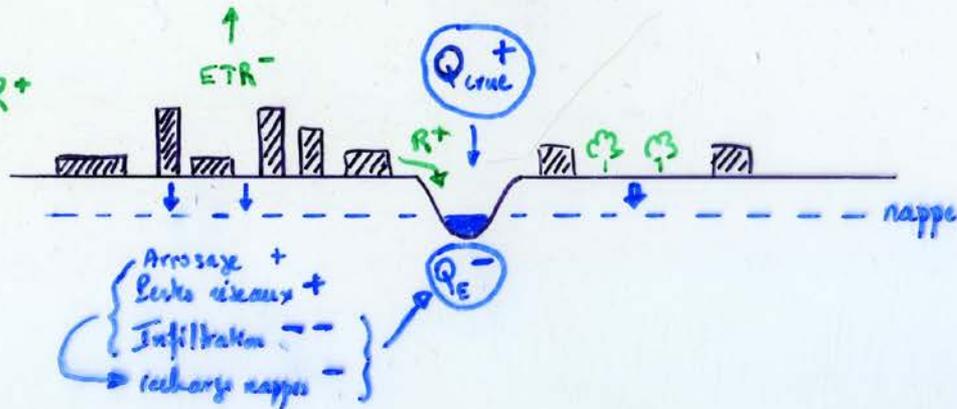
#### Effets +

- **Effet des pertes en réseau** sur le niveau de nappes = recharge (cf 8 m<sup>3</sup>/s à Paris)
- Importance des **eaux usées** (effluents de STEP ou rejets directs) dans l'écoulement à l'aval des villes. Tenir compte de la taille de la rivière et de la ville (potentiel de dilution). 1 M hab. rejettent 7 m<sup>3</sup>/s dans un pays industrialisé).

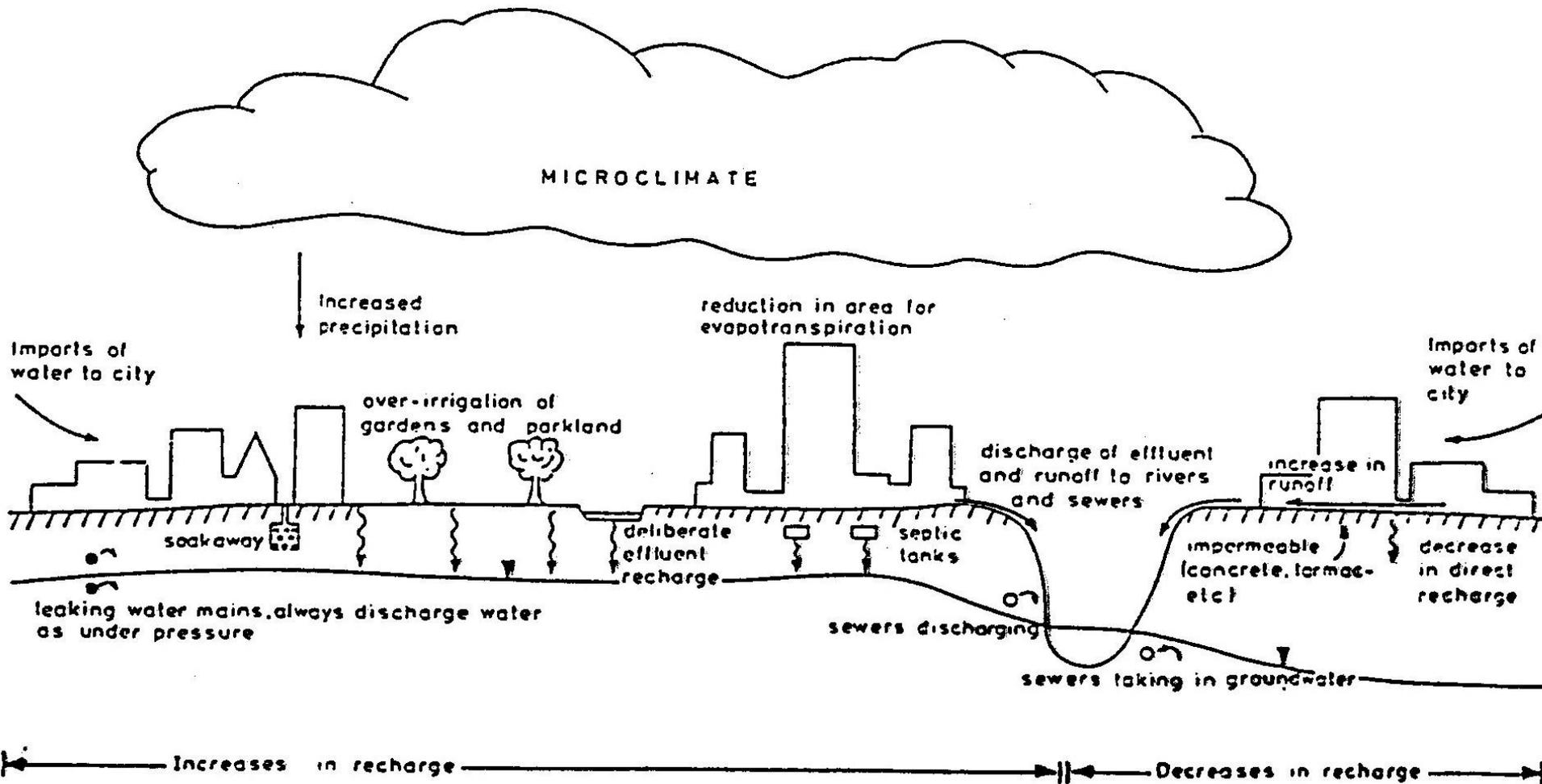
$P^+ (\approx 10\%)$



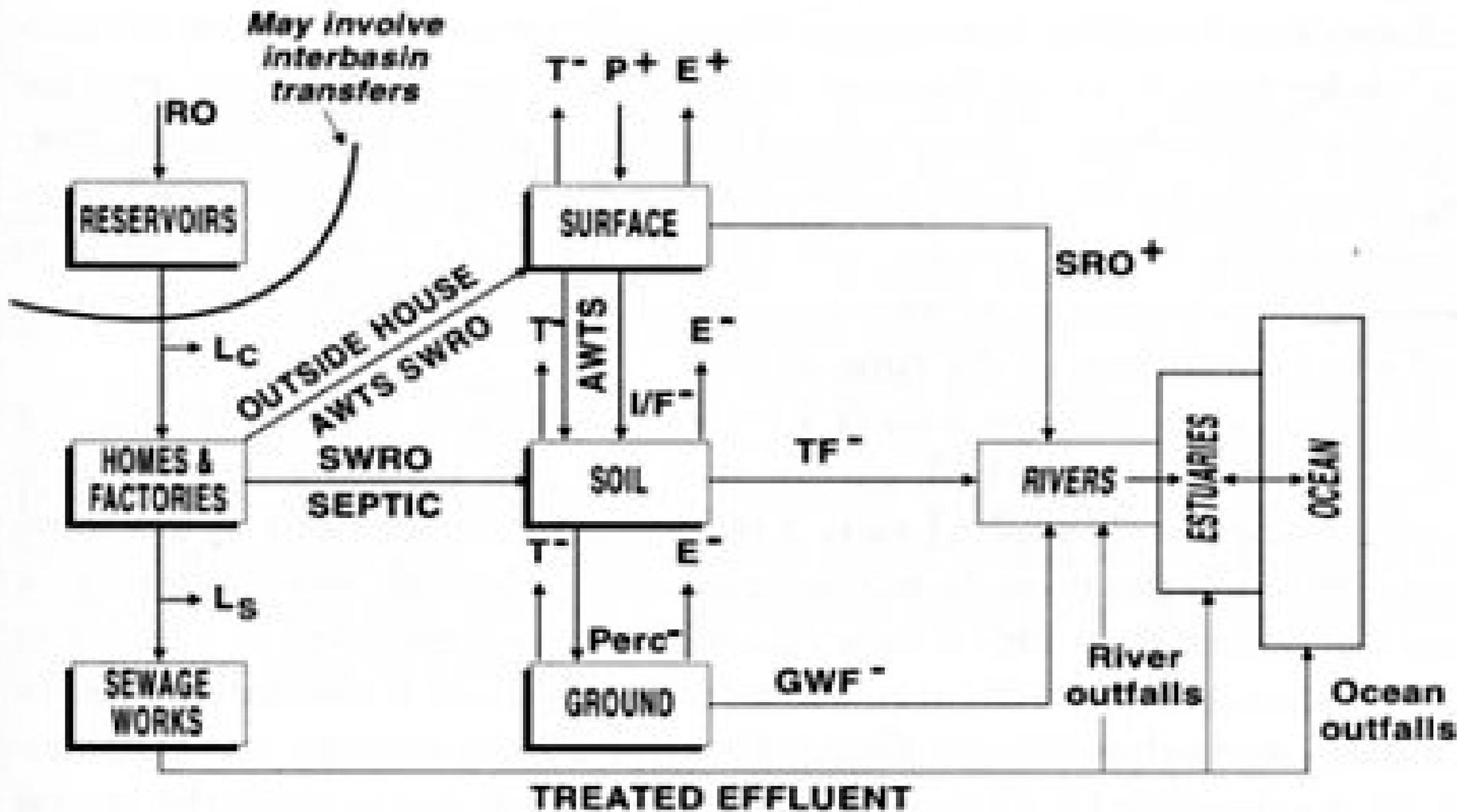
$\left\{ \begin{array}{l} T^{\circ}C + \\ \text{Surfaces imperméables} + \\ \text{Arrosage} + \end{array} \right\} ETR^- \Rightarrow R^+$



- 1 Avant urbanisation
- 2 Après



Effets de la ville sur l'alimentation des nappes  
 (Van de Ven, 1990).



**Figure 4.3** Simplified urban hydrological cycle (after Warner 1976). Symbols are as in Figure 4.1. Additional: AWTS is aerated water treatment system;  $L_c$  is leakages of clean water;  $L_s$  leakages of sewage; Perc is percolation to groundwater; SWRO is stormwater runoff.

## 2 - EFFET DES SURFACES URBANISÉES SUR L'ÉCOULEMENT DE SURFACE R (2)

### Aggravation des pointes de crue

- Raccourcissement du temps de réponse entre P et R
- Élévation du pic de crue
- Raccourcissement de la durée de la phase d'écoulement

Les petites crues sont les plus affectées par l'imperméabilisation. Les fortes pluies le sont moins (car la campagne a des sols saturés si fortes pluies)

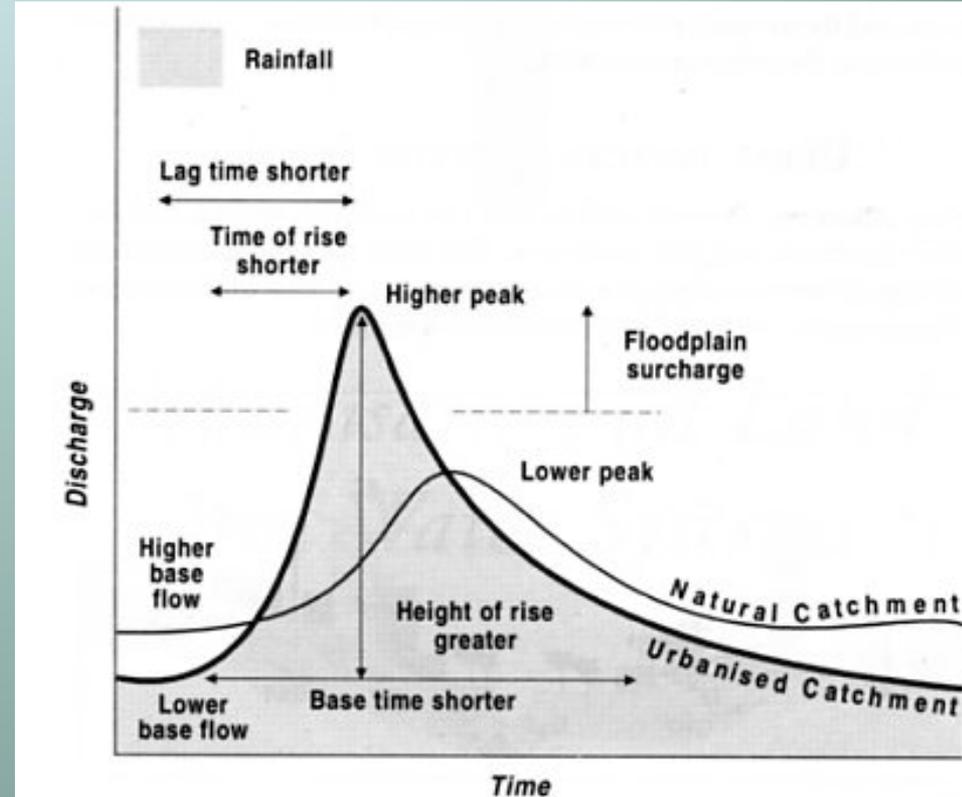
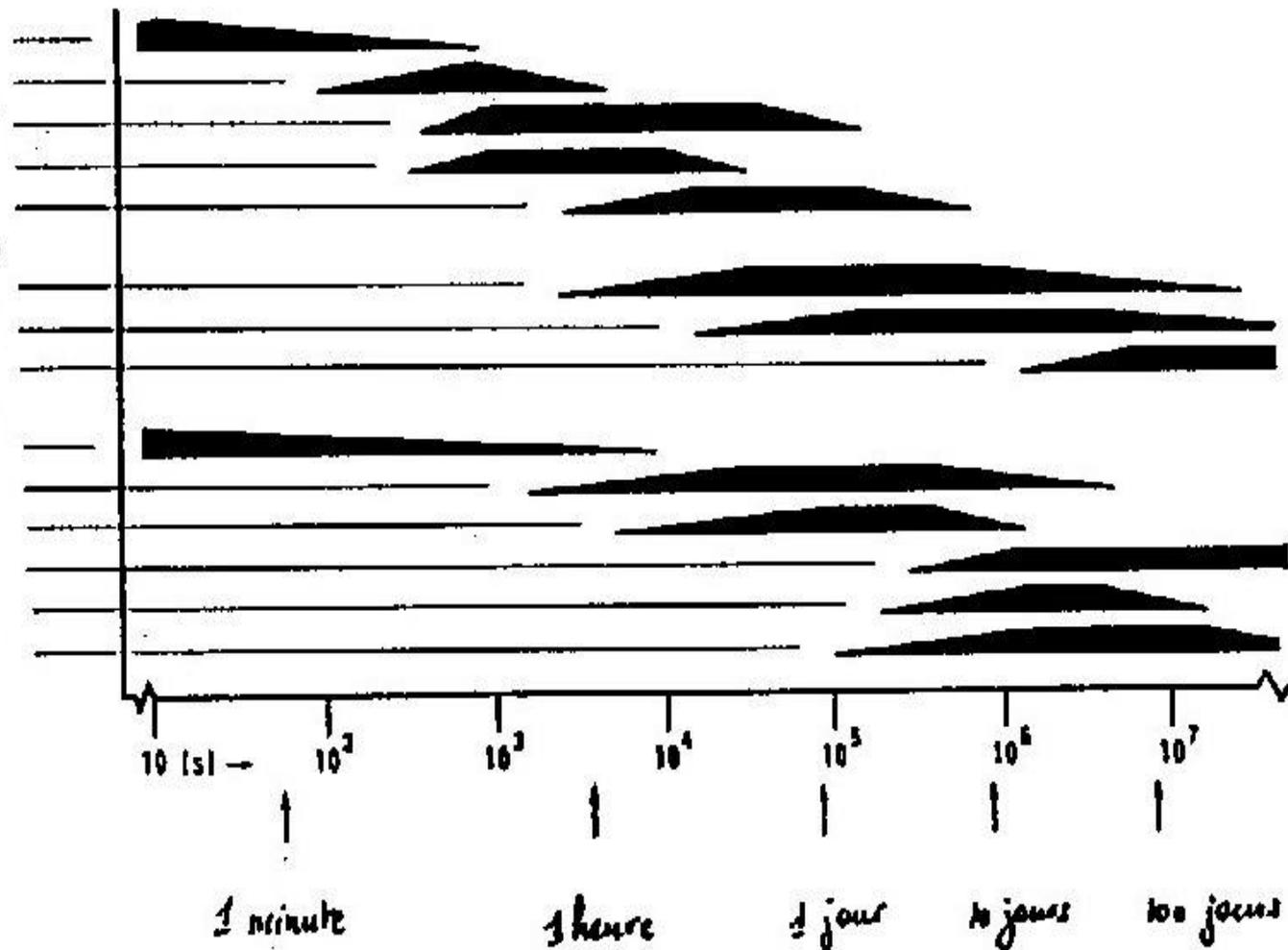


Figure 4.2 The urban hydrograph (after Warner 1976).

Précipitations  
 Entrée ds les évents  
 Flux ds les évents (non séparés)  
 " " " (séparés)  
 Ruissellement de surface  
 Zone d'infiltration non saturée  
 drainage souterrain (nappe)  
 nappe profonde  
 Lessivage des sédiments poreux  
 Oxydation de l'oxygène  
 Bactéries  
 nutriments (eutrophication)  
 oxygène des sédiments  
 adsorption par les sédiments



Quelques constantes de temps impliquées dans les processus  
 d'écoulement urbain (van de Ven, 1990).

## 2 - EFFET DES SURFACES URBANISÉES SUR L'ÉCOULEMENT DE SURFACE R (2)

### Altération de l'écoulement saisonnier dans les régions froides

Ex: Moscou: les impacts sur l'écoulement dépendent des saisons

- 200 mm en hiver sous forme de neige (sur 90 km<sup>2</sup>). Cette neige est **rejetée au réseau fluvial** avant la fonte (moyens mécaniques) ou emploi de produits chimiques
- Une chute de 300 000 m<sup>3</sup> >> 100 000 m<sup>3</sup> eau dans la Moskwa
- Coeff. **R = 1 en hiver avec temps de réponse très raccourci** (terres agricoles = 0,75 - forêts = 0,20)
- Mais les P d'été et automne s'infiltrent et s'évaporent en ville avec moins de différence par rapport à la campagne

### 3 - LES TECHNIQUES DE CONTRÔLE DES ÉCOULEMENTS (1)

#### A - Le stockage des eaux de pluie à l'amont des agglomérations

- Bassins de régulation en série vidés après orage
- Réservoirs amont

#### B - Le stockage sur site

- **Création de bassins paysagers ( à ciel ouvert) et aménagement de zones inondables intra-urbaines**

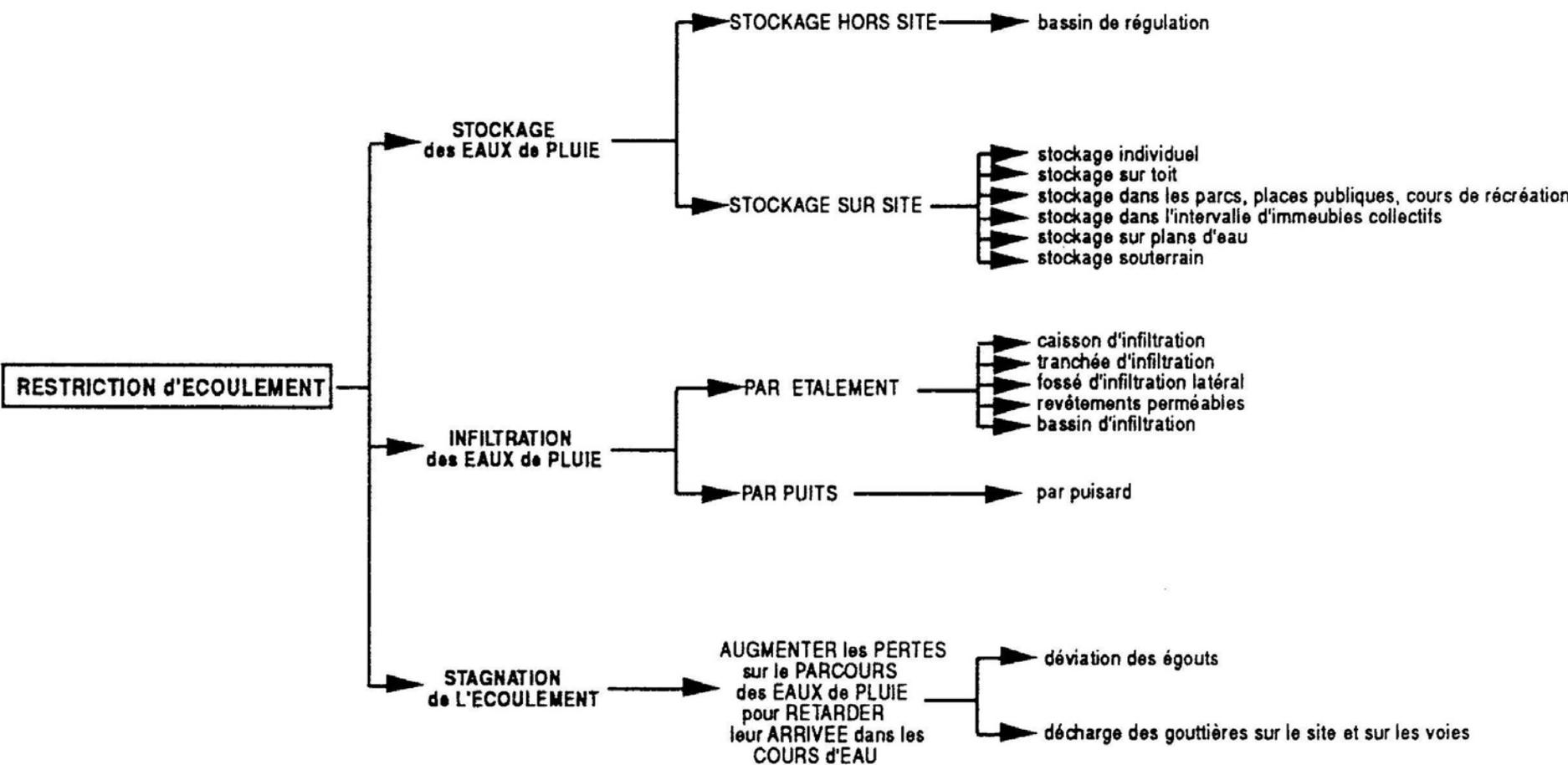
Ex: **Seine-St-Denis**: 0,8 hm<sup>3</sup> stockés sur un apport de 3 hm<sup>3</sup> (P10); sur ces 0,8 hm<sup>3</sup> = 0,76 dans ce type de bassin (à sec: 0,30; engazonnés: 0,20; en eau: 0,25; zones inondables: 0,15)

- Le plus simple: le maintien des ZI avec bassins de 100 à 200 000 m<sup>3</sup> mais principe récent (sport, parcs, prés, golfs)
- Bassins en eau plus anciens (années 80): demande écologique. Nappe affleurante

Ex: **Le Blanc Mesnil**. La Morée ne peut y dépasser 50l/s. ZAC de la Libération (10 ha) > 1 m<sup>3</sup>/s pour P10. Création d'un bassin de 6000 m<sup>3</sup> (capable de retenir Q50) sur 1 ha / marnage de 1 m / forage pour donner 20 m<sup>3</sup>/h et assurer le maintien en eau

Ex: Marne-la-Vallée. 20 retenues en eau dans le fond du Ru de Maubuée (étangs jouant un rôle épurateur)

Pb: **le coût du foncier**: les Pays-Bas stockent dans les cours d'eau, Londres et les docks



*Techniques de contrôle de l'écoulement*

*(Takahashi, 1990)*

### 3 - LES TECHNIQUES DE CONTRÔLE DES ÉCOULEMENTS (2)

#### C - Le stockage dans des bassins enterrés

Situation des villes à coût foncier élevé. 10-15 000 m<sup>3</sup> sous les immeubles de Tokyo et Osaka.

Prix x 5 à 10 (génie civil) mais compensation par moindre coût du foncier (1 ha stocke 25 000 m<sup>3</sup>).

Prix de revient = 100 € pour 1 m<sup>3</sup> en bassin enherbé, mais 200 à 800 € pour les bassins enterrés

#### Ex: Villes à tissu dense et exutoires saturés

- **Nancy** / 300 000 h. sur 16 000 ha à pentes fortes + forts orages estivaux - Début en 1971 avec 15 bassins dont 8 enterrés pour régler la question de R à l'échelle de sous-bassins. Dans le BV de Ste Anne (1000 ha) > 3 bassins enterrés sous parking, rue et carrefour, dont celui des Ducs de Bar (33 000 m<sup>3</sup>) qui peut absorber 16 m<sup>3</sup>/s. = contrôle des écoulements en centre-ville.
- **Saint-Denis**. Multiplication de bassins de 500-1000 m<sup>3</sup> sous garages, espaces verts, dans des collecteurs sur-dimensionnés depuis 1990.

## Ex: Villes littorales sous contrôle de la marée

- **Bordeaux** sur 55 000 ha dont 13 500 sous la marée haute (+ 7 m), donc inondables. Création de 27 bassins dont 5 enterrés (1,2 hm<sup>3</sup>). Un constructeur ne peut envoyer au réseau + 2 l/s/ha. Terrains de foot-ball, Université Talence, immeuble
- **Saint-Malo** avec 50 000 h mais 250 000 en été. Marnage 13,60 m. A marée haute, 450 ha à 4 m sous le niveau de la mer (20 000 hab.). Stations de relevage pour 13 m<sup>3</sup>/s mais P10 donne 30 m<sup>3</sup>/s >> bassins de retenue paysagers pour stocker 75 000 m<sup>3</sup>.

### **3 - LES TECHNIQUES DE CONTRÔLE DES ÉCOULEMENTS (3)**

#### **D - L'infiltration des eaux de pluie**

Caissons, tranchées, bassins d'infiltration et puits, revêtements perméables

#### **E - le retardement de l'écoulement**

Parkings enherbés à lit de sable > caniveaux > rivière ou égouts au dessin complexe

#### **F - Le refoulement des eaux urbaines vers le réseau hydrographique**

Ex: **Randstad Holland et les polders**. Les canaux couvrent de 2 à 9 % de l'aire urbaine. Calibrage sur R10 = 12 à 36 mm en 24 h, en prenant en compte P10 de 40 mm en 24 h

#### **G - La collecte et le rejet à l'aval**

Ex: **Nîmes**: grand collecteur dans l'axe du Vistre

### **3 - LES TECHNIQUES DE CONTRÔLE DES ÉCOULEMENTS (3)**

#### **D - L'infiltration des eaux de pluie**

Caissons, tranchées, bassins d'infiltration et puits, revêtements perméables

#### **E - le retardement de l'écoulement**

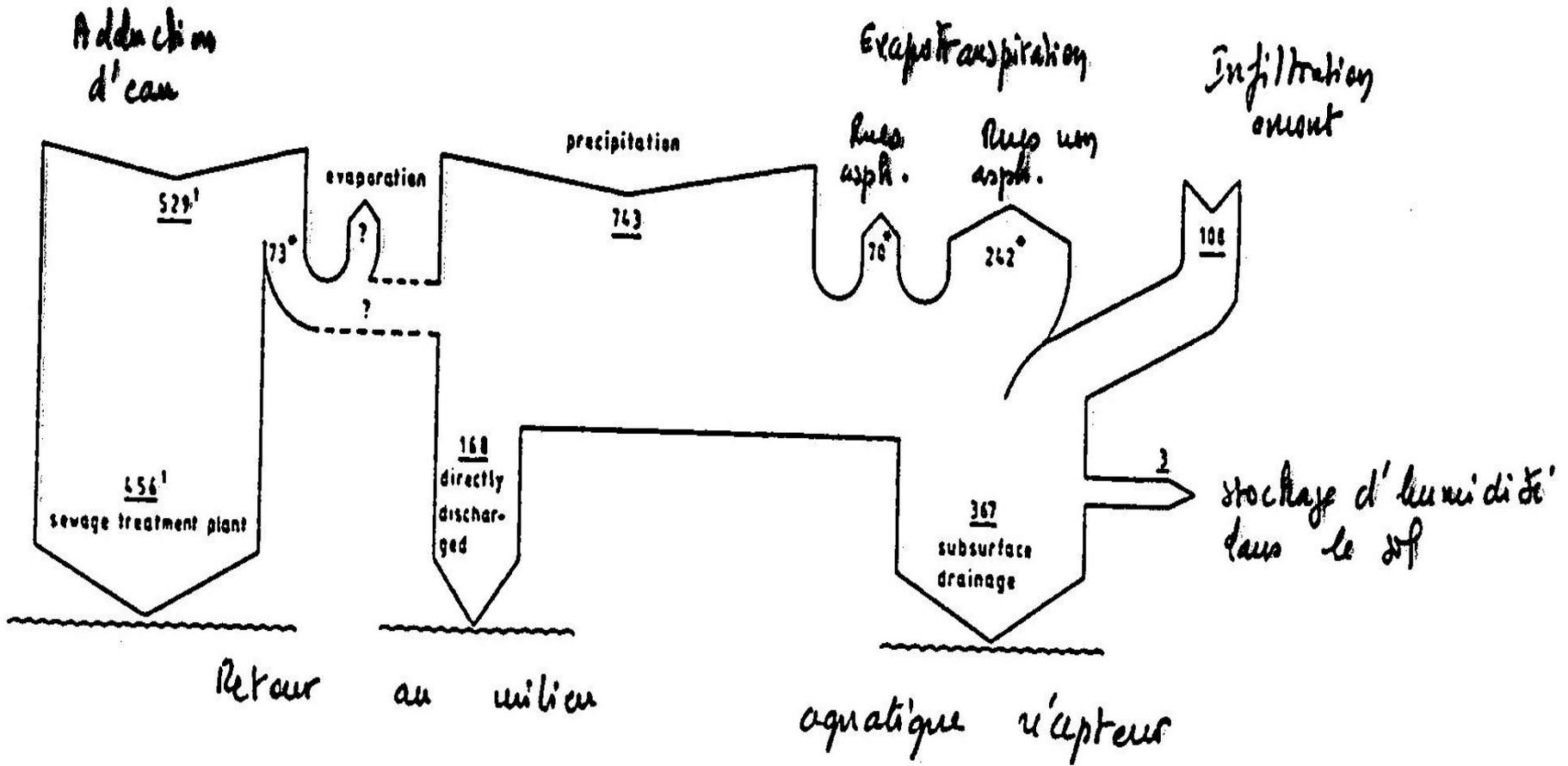
Parkings enherbés à lit de sable > caniveaux > rivière ou égouts au dessin complexe

#### **F - Le refoulement des eaux urbaines vers le réseau hydrographique**

Ex: **Randstad Holland et les polders**. Les canaux couvrent de 2 à 9 % de l'aire urbaine. Calibrage sur R10 = 12 à 36 mm en 24 h, en prenant en compte P10 de 40 mm en 24 h

#### **G - La collecte et le rejet à l'aval**

Ex: **Nîmes**: grand collecteur dans l'axe du Vistre



Bilan de l'eau annuel de la ville de  
Leystad sur la période 1970-1984.  
 (Van de Ven, 1990).

## 5 - L'IMPACT DES MODIFICATIONS DE L'ÉCOULEMENT SUR LES COURS D'EAU À L'AVAL DES VILLES

### A - Le temps de réponse de l'écoulement

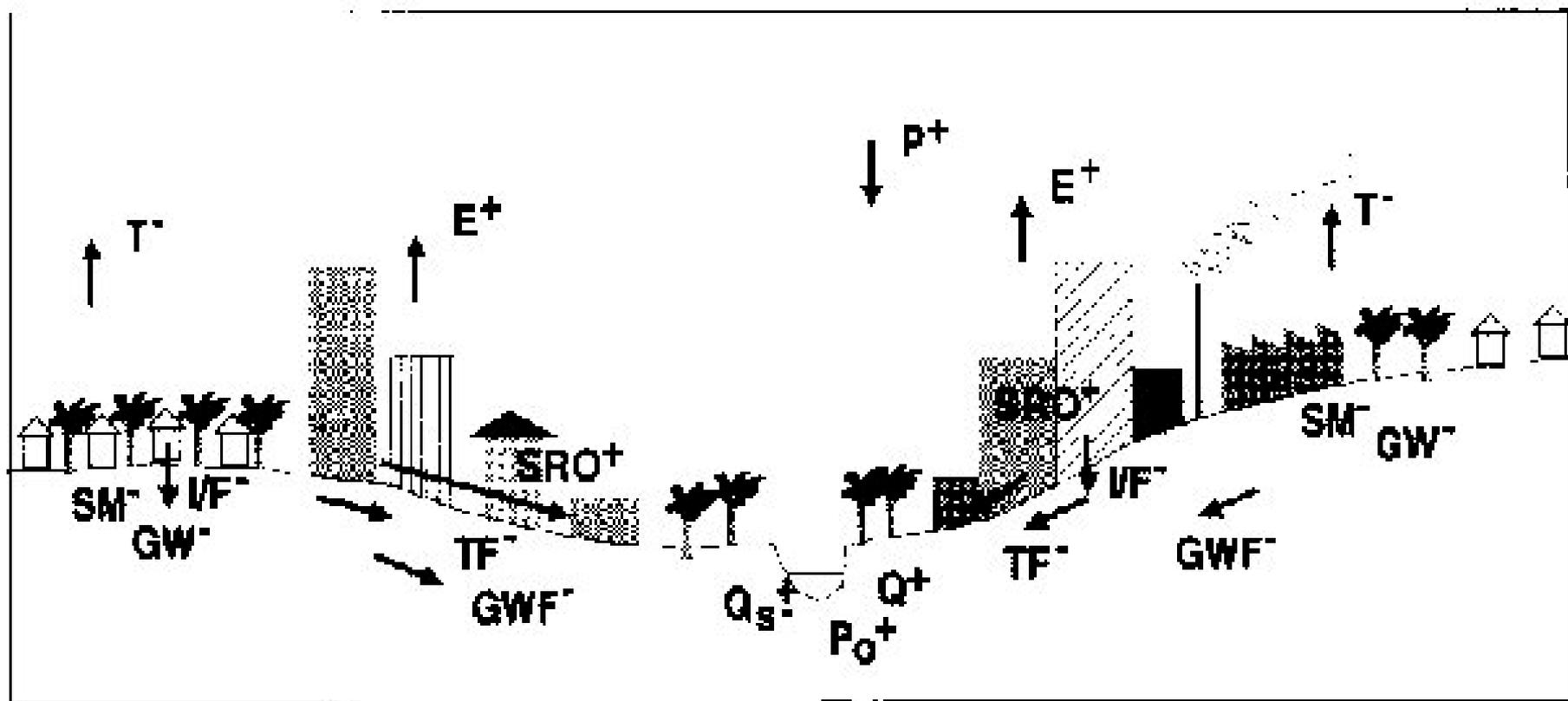
Figure

### B - Les impacts géomorphologiques

- **Simplification des réseaux de drainage** par l'urbanisation (suppression des chenaux de rang 1 & 2)
- Le **transport sédimentaire en phase de construction augmente**
- **Réajustements géomorphologiques différés** / Si  $BV < 25 \text{ km}^2$  / Effectif pour  $Q_{pb}$  / augmentation des pics de crue, de la capacité de transport > augmentation de la dimension de la section (BV rural mixte = 1 ; BV boisé = 0,75 ; Ville nouvelle récente = 1,1 ; cultures = 1,3 ; quartier à villas de + 4 ans avec égouts = 2,2 ; urbanisme de rues avec égouts = 6 / élargissement ou approfondissement

### C - Les impacts sur la qualité des eaux de surface

- Saturation des STEP en cas d'orage et rejets non traités (cf orages estivaux)
- Apport de MO biodégradables qui consomment  $O_2$  de l'eau / chocs
- Les MES limitent la photosynthèse
- Apport de métaux lourds et d'hydrocarbures
- Succession et effet de stress



**Figure 4.1** Hydrological changes in urban areas.  $P^+$  is increased precipitation;  $E^+$  is increased evaporation;  $T^-$  is decreased transpiration;  $I/F^-$  decreased infiltration;  $SM^-$  decreased soil moisture;  $GW^-$  decreased groundwater;  $TF^-$  decreased throughflow;  $GWF^-$  decreased groundwater flow;  $SRO^+$  greatly increased surface runoff;  $Q^+$  increased discharge;  $Q_s^+$  increased sediment discharge in the construction phases (decreased in established urban areas),  $P_o^+$  increased pollution load.