

Environnement et Ville Durable

La ville souterraine : urbanisation et eaux souterraines

Thierry Winiarski Directeur de Recherche



ENTPE

L'école de l'aménagement durable des territoires

Ecole Nationale des Travaux
Publics de l'Etat

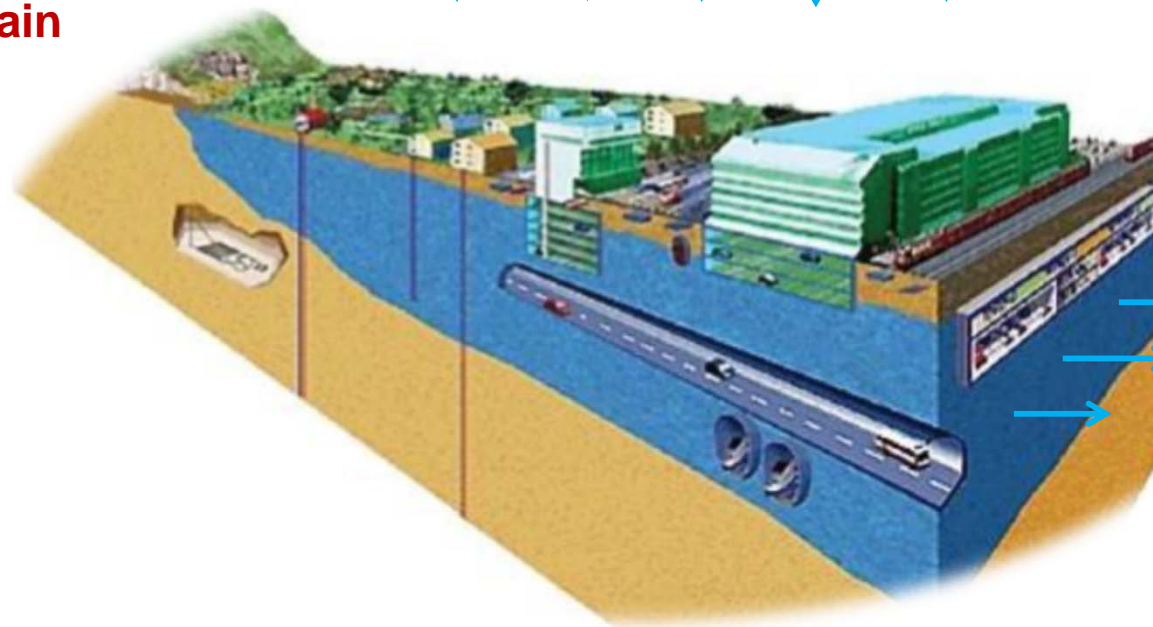


Laboratoire d'Ecologie des
Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
UMR CNRS 5023

Les eaux pluviales urbaines

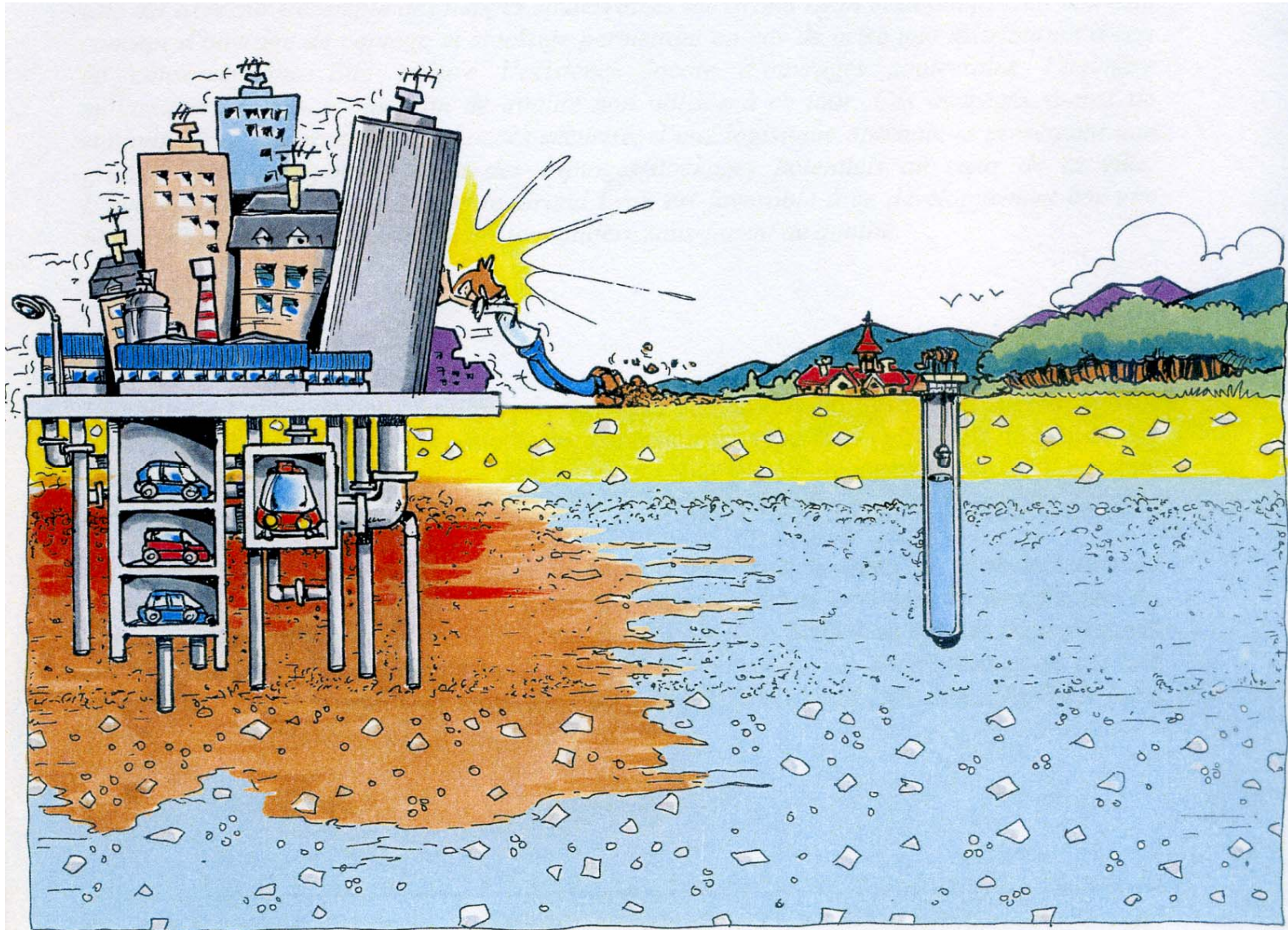


Le milieu souterrain en milieu urbain

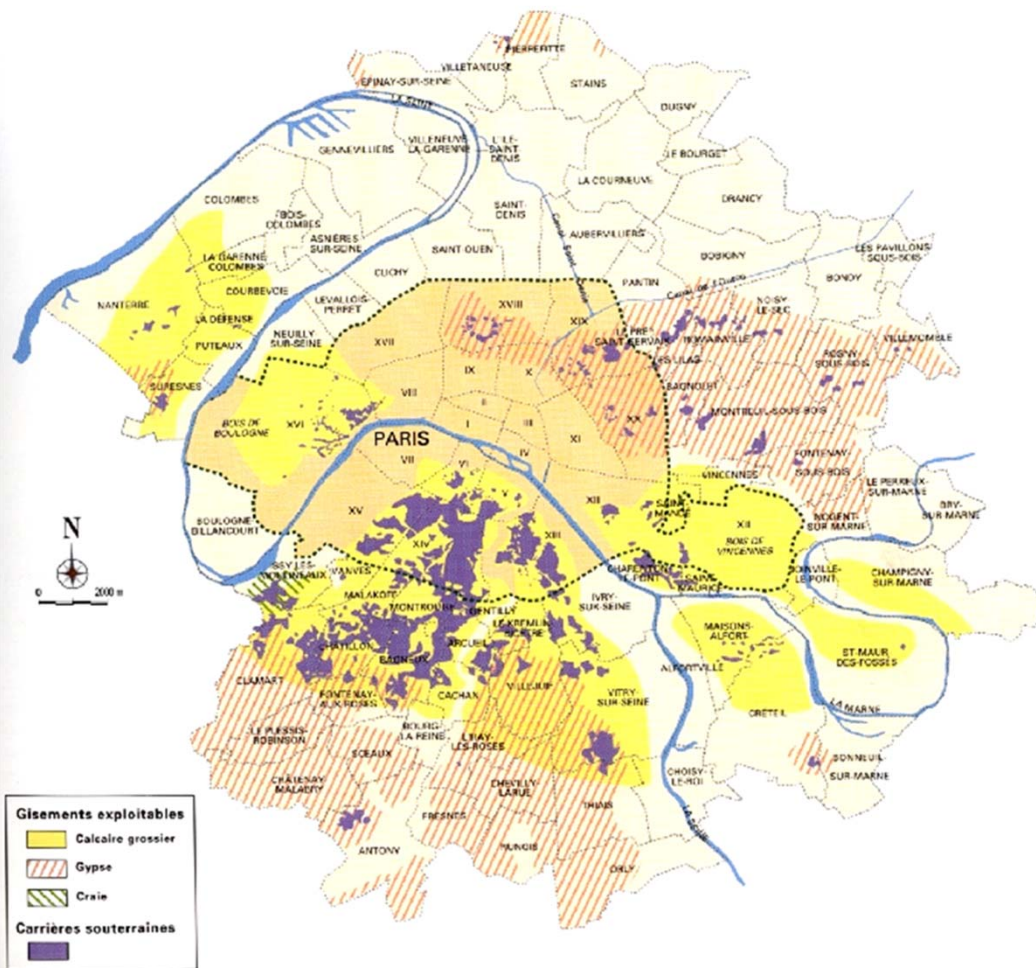


Les aquifères urbains

Le milieu souterrain en milieu urbain



Les carrières de Paris



Superficie et population (dates des enceintes)

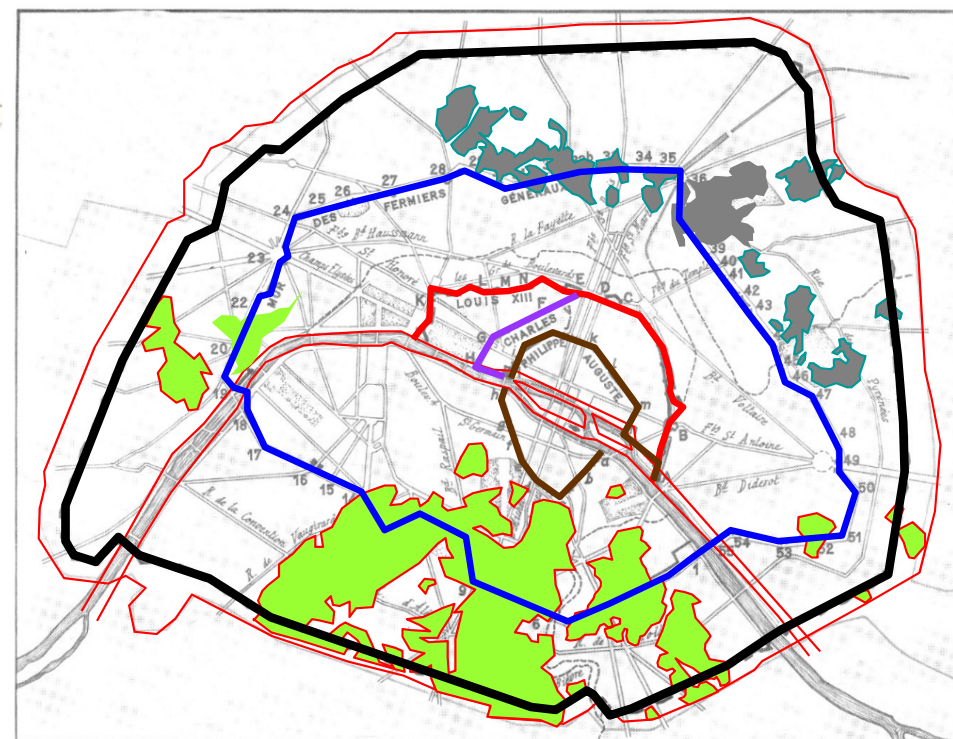
1200 Ph-A. 253ha
200.000 hab

1380 Ch. V 430ha
275.000 hab

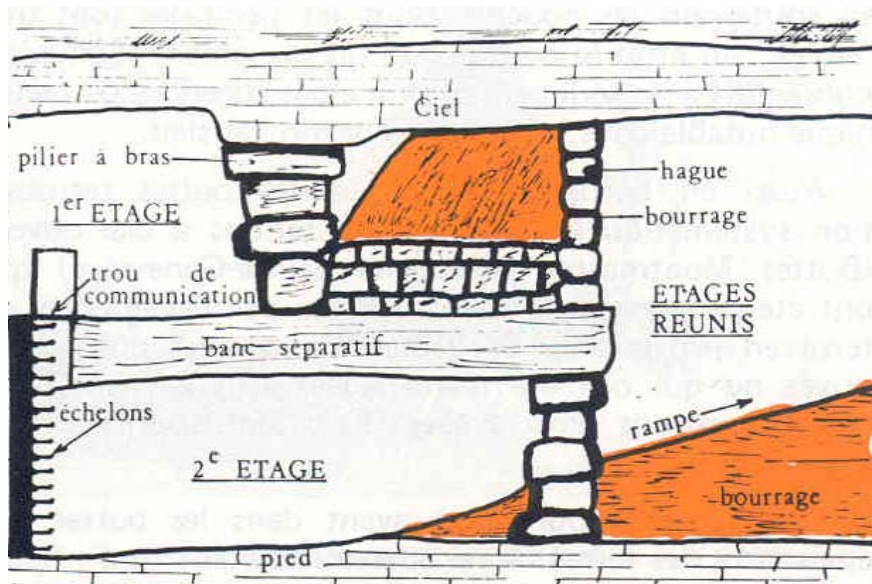
1650 L. XIII 1103ha
500.000 hab

1800 Révol. 3400ha
547.000 hab

1860 N.III 7802ha
1.668.000 hab



L'exemple des carrières souterraines à Paris



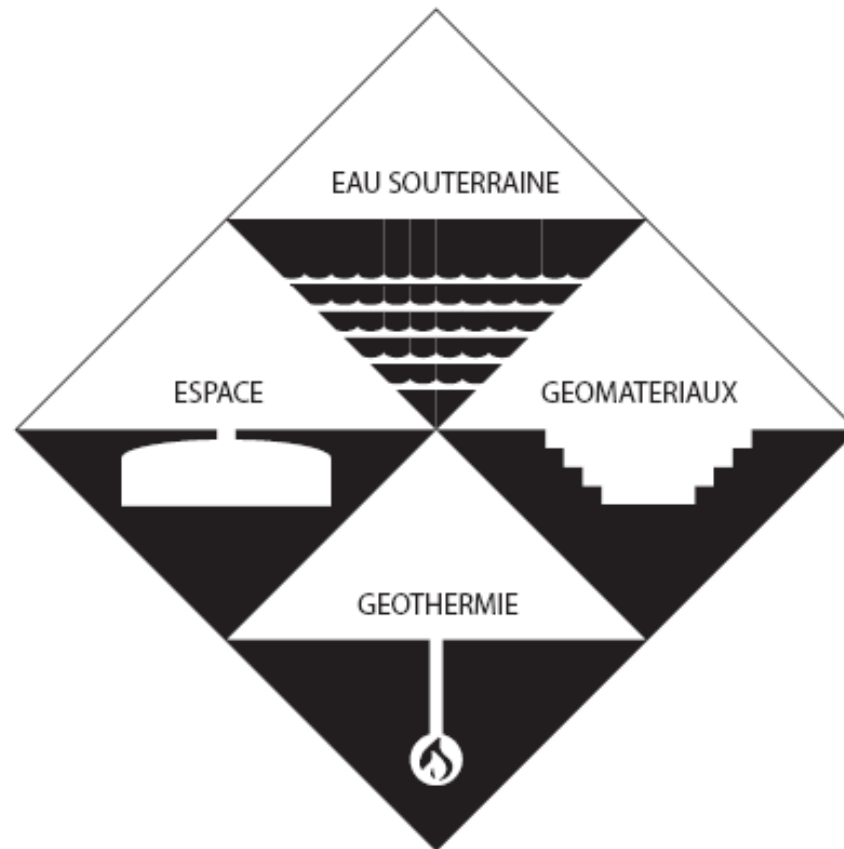
Les carrières souterraines, partiellement rebouchées, ont été la cause de nombreux accidents, qui ont conduit Napoléon 1^{er} à créer en le service qui deviendra **l'Inspection Générale des Carrières**.

Les règles appliquées actuellement sont de combler les carrières ou de les traverser par des pieux.



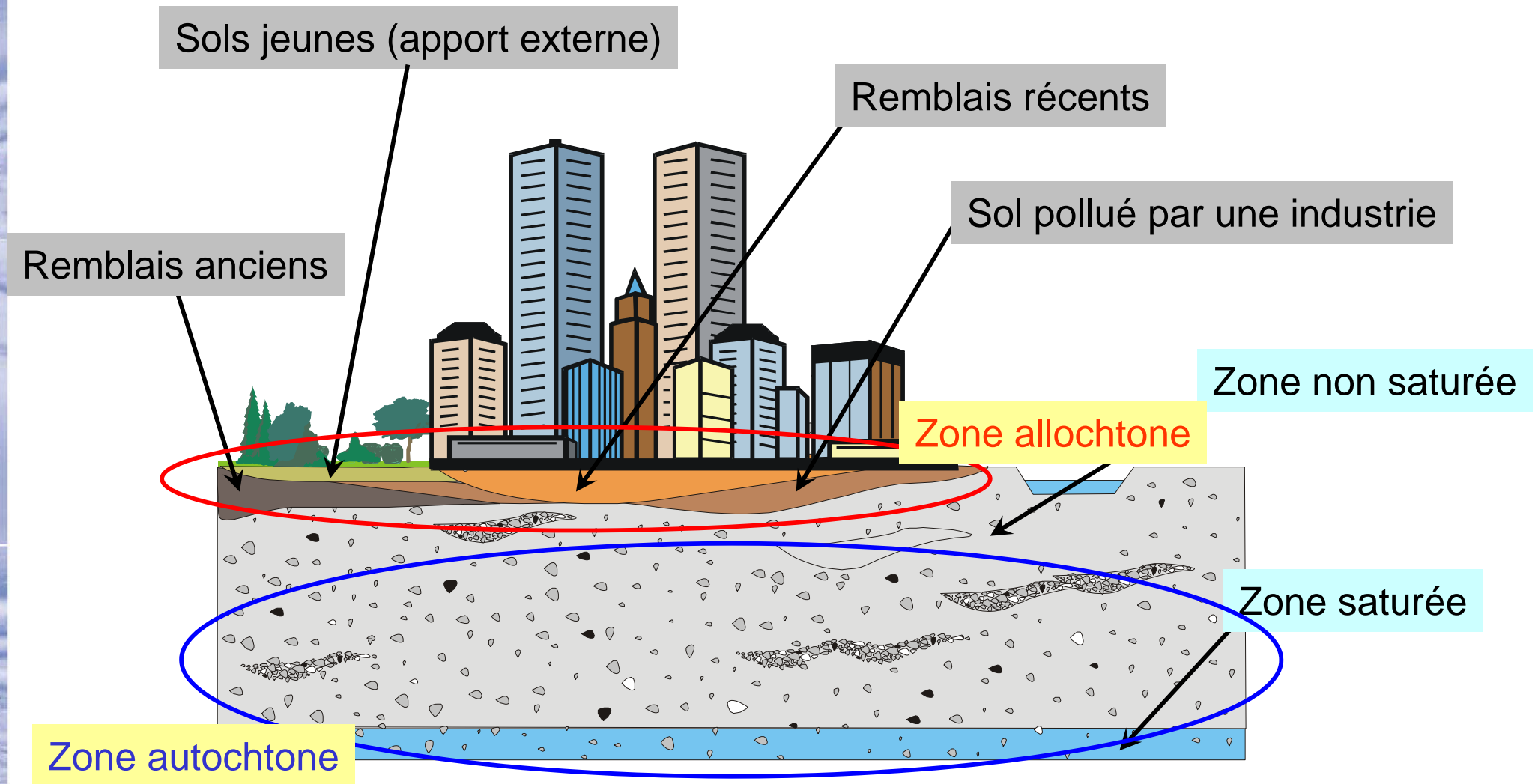
Carrière de Vaugirard (Porte de Versailles)

Les ressources du sous sol urbain



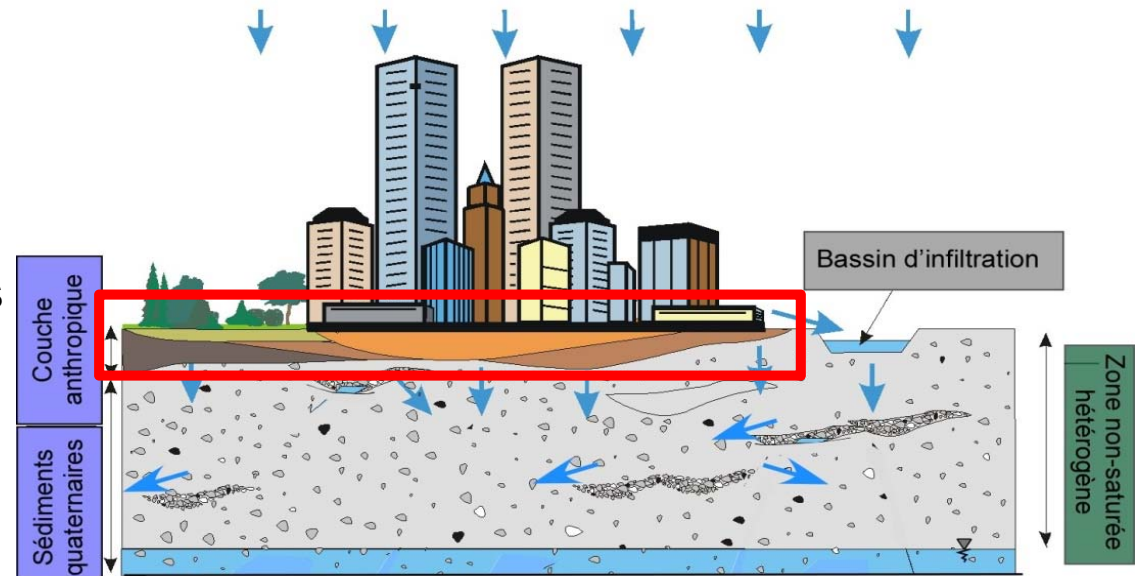
Les ressources du sous-sol urbain (Blunier P., 2009)

Un environnement souterrain compartimenté



Le compartiment anthropogène

- couche anthropique
- constitué par le remaniement et l'accumulation de matériaux de nature diverse
- remblais urbains, structures anthropiques enfouies



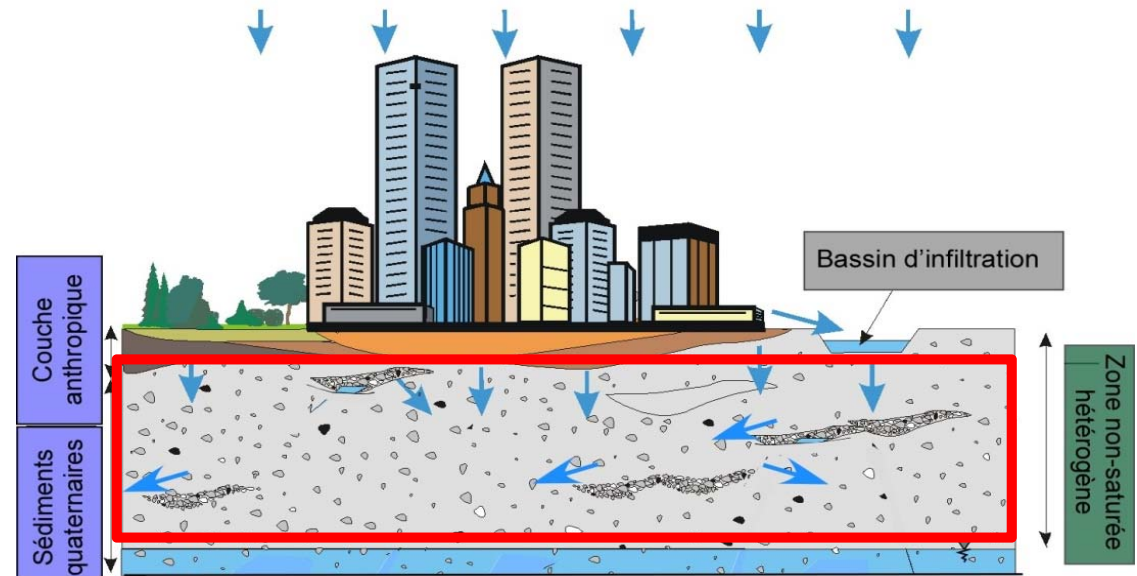
Remblais urbains, Montréal



Quartier St Georges, Lyon

Le compartiment "autochtone"

- constitué par la formation géologique en place (formation alluvionnaire, fluviatile/fluvioglaciaire)
- architecture sédimentaire hétérogène
- anisotropie des propriétés hydrodynamiques
- écoulements et transferts hétérogènes



1 m

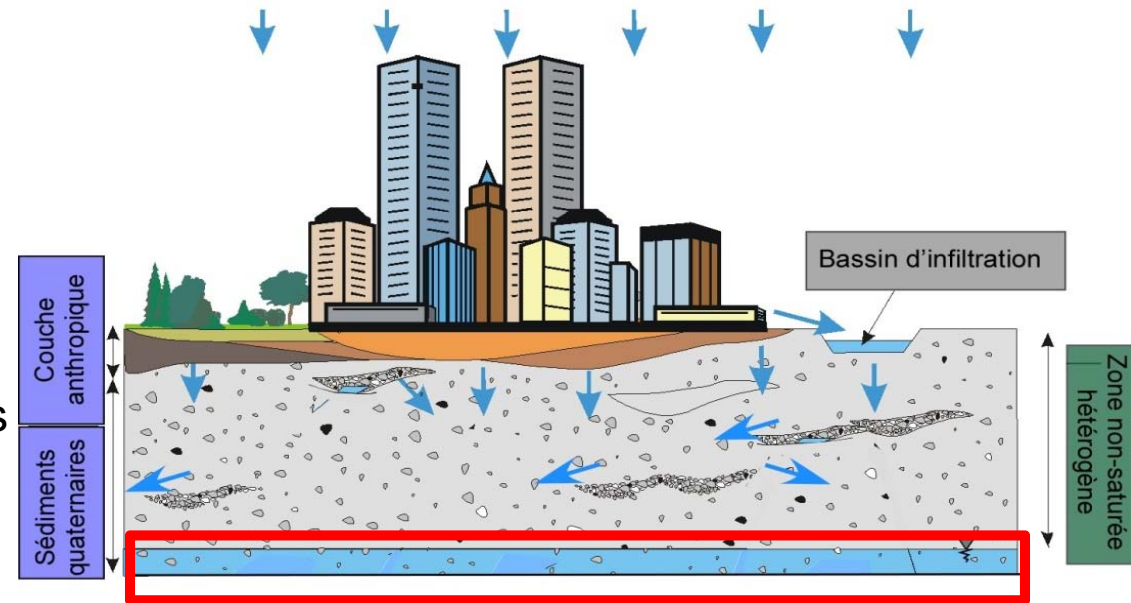


Parking souterrain Fosse aux Ours, Lyon



La nappe urbaine

- zone saturée autochtone
- déséquilibre hydrologique : le **prélèvement** accru des ressources en eau ajouté à l'**imperméabilisation** des surfaces engendre une diminution de la recharge en eaux souterraines

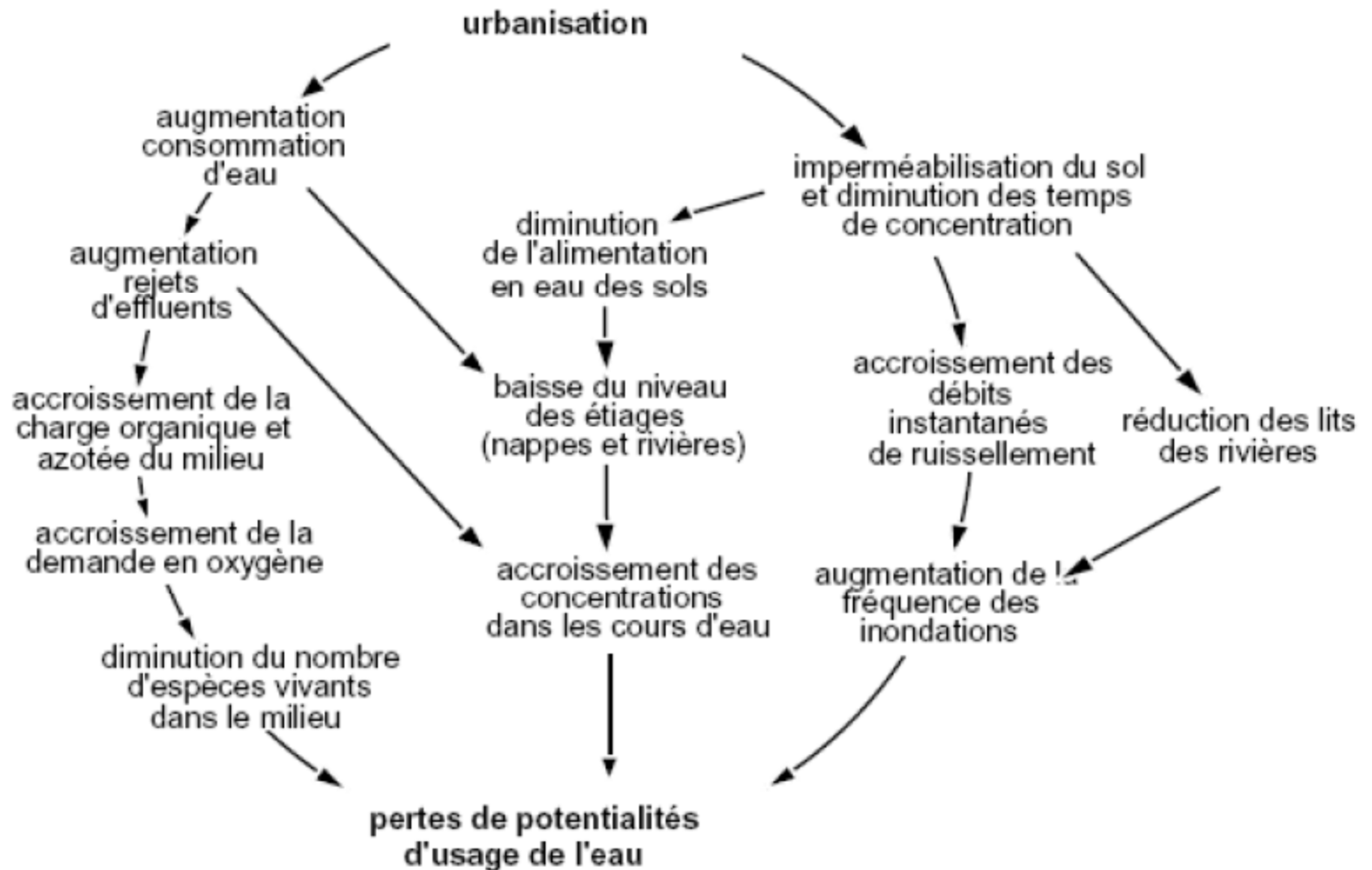


Archives municipales de Lyon

Place Bellecour, 1979, LYON

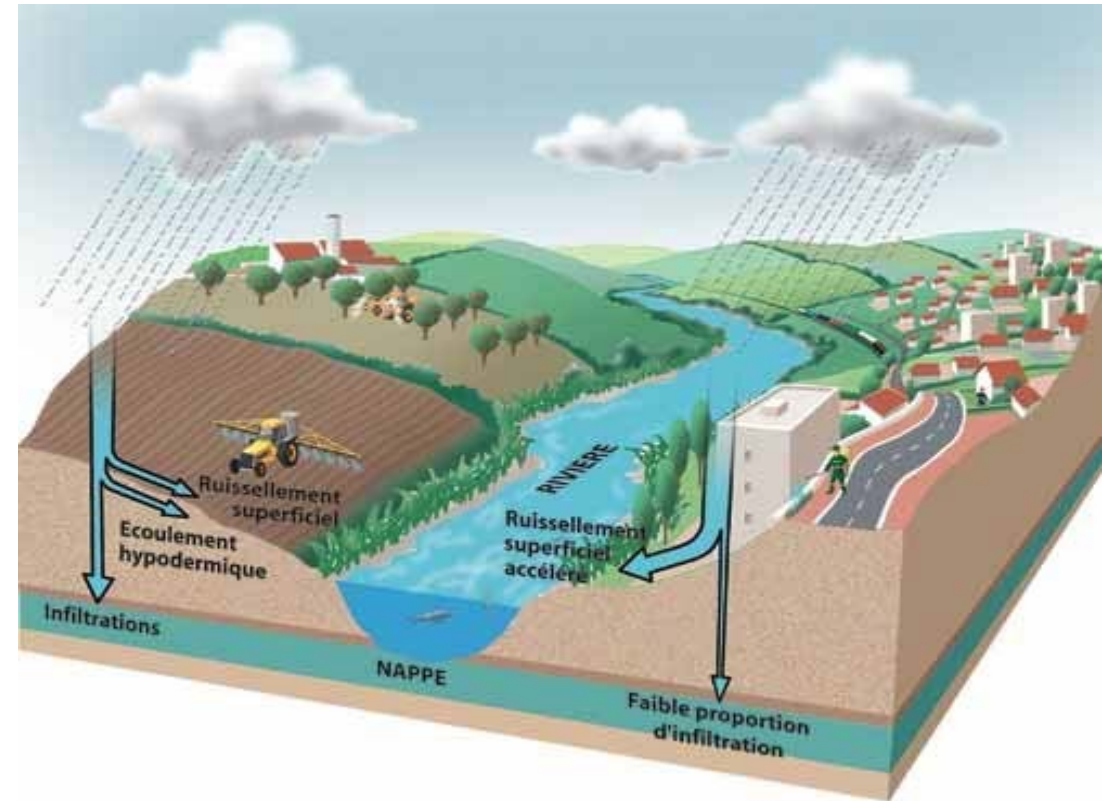
Affleurement de la nappe lors de la construction de la ligne de métro A

Le problème de l'eau en milieu urbain



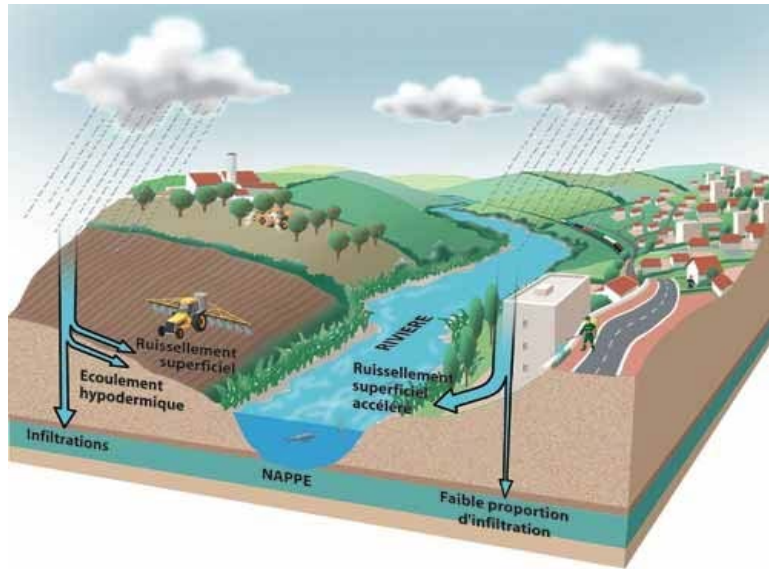
Les parts respectives du **ruissellement** et de l'**infiltration** sont régies par de nombreux facteurs:

- la géomorphologie du bassin : pente topographique, réseau hydrographique;
- la lithologie du sous-sol;
- le sol : nature, humidité, couverture végétale;
- L'aménagement des eaux et des sols:
 - Barrages et dérivation des cours d'eau,
 - rectification de lit, drainage des zones humides,
 - imperméabilisation des surfaces (zones urbaines, voies de communication),
 - pratiques agricoles...

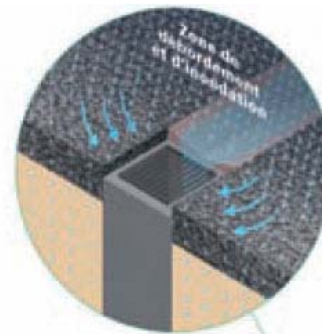


Comparaison des vitesses de ruissellement entre zone agricole et urbaine

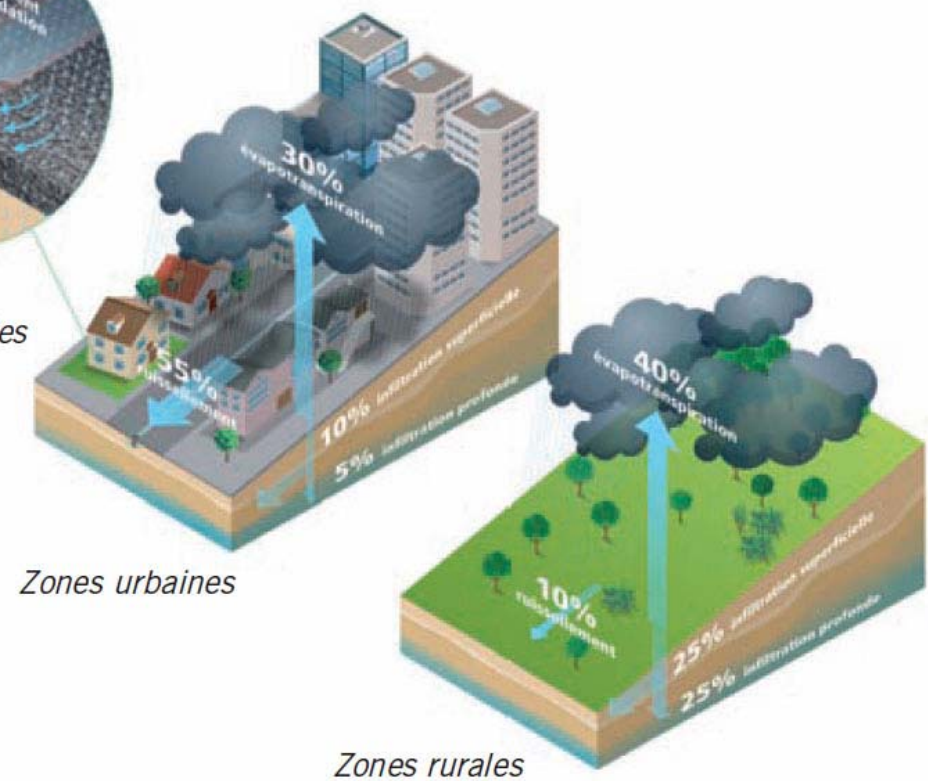
2. Les eaux pluviales urbaines



En hydrologie urbain :
Eaux pluviales = eaux de ruissellement + eaux de pluie



*Concentration
des eaux de pluies
en un point*



La surface urbaine tend
vers une
imperméabilisation

La spécificité du contexte urbain

Eau météoritique

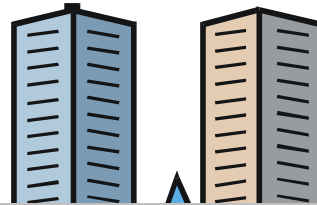


Pollution atmosphérique de proximité

Eau de pluie



Pollution de surface



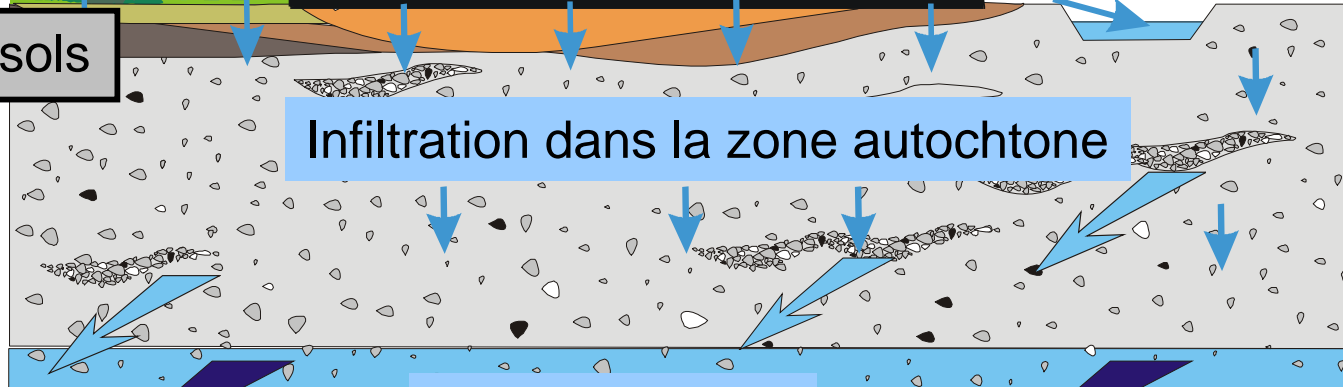
Eau pluviale = pluie + ruissellement



Infiltration dans la zone allochtone

Ruissellement

Pollution des sols



Infiltration dans la zone autochtone

Aquifère alluvial

Un peu d'histoire

- Dès 1888, le Congrès International d'Hygiène de Vienne soulignait que les eaux urbaines étaient très polluées.
- Les eaux usées et les eaux pluviales n'ont pas les mêmes caractéristiques
- Les problèmes quantitatif et qualitatif des rejets pluviaux dans les milieux scientifiques et techniques (années 1950 à 1970) ont donné lieu aux premières publications scientifiques, principalement aux Etats-Unis (bilan pollutions, travaux de recherche, etc.).
- Dans les années 1970-1980, la France prend conscience du problème lié à l'augmentation sensible de l'imperméabilisation, et donc des ruissellements liés à l'accélération de la croissance urbaine.
- De plus, le tassement dû aux ouvrages, à la circulation, au piétinement, ou encore la pollution engendrée par le stockage des déchets induisent des différences entre les sols allochtones et les formations superficielles autochtones.

Trois principes

- **Principe hygiéniste** (XIX^{ème} siècle jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle) :
 - Evacuation rapide des eaux usées et pluviales le plus loin possible des villes par un réseau unitaire et/ou séparatif
 - Traitement en stations d'épuration, avant d'être rejetées dans le milieu naturel
 - Modification profonde du cycle hydrologique
 - Les eaux pluviales, considérées non polluées à priori, sont le plus possible drainées en surface rejetées directement dans le milieu naturel (cours d'eau)
- **Principe hydraulique** (à partir du milieu du XX^{ème} siècle) :
 - Imperméabilisation des surfaces de plus en plus importante (développement urbain périphérique, développement de l'automobile, ...)
 - Débordements de réseaux de plus en plus fréquent
 - Approche quantitative de l'assainissement
 - limitation des débits par la mise en place de réseaux séparatifs et de techniques alternatives aux réseaux
 - Instruction interministérielle de 1977 propose pour la 1^{er} fois une alternative aux réseaux : les bassins de retenue.
 - Ce concept s'oppose aux principes hygiénistes prônant une évacuation rapide et directe.
 - Ce concept ne prend pas en compte la qualité des rejets et leur impact potentiel sur le milieu récepteur et les ressources en eau
- **Principe environnementaliste** (depuis les années 1980) : *approche qualitative avec une volonté de préserver durablement les milieux récepteurs (sous-sol et ressources en eau)*

Un zoom sur le concept Environnementaliste

Les préoccupations environnementales sont à l'origine d'une nouvelle approche dominée par la volonté d'une préservation durable des milieux naturels.

- Approche complexe de la gestion des eaux en milieu urbain en intégrant des aspects quantitatifs et qualitatifs.
- Permettre aux eaux de réintégrer un cycle hydrologique plus naturel en limitant leur transfert en surface ou en réseaux.
- Il s'agit de restituer au milieu naturel la plus grande quantité d'eau de ruissellement pluvial possible,
- Il s'agit aussi que ce retour au milieu naturel se fasse de façon à ce que la qualité des eaux affecte le moins possible le milieu récepteur.
- D'où le développement de techniques de contrôle à la source des rejets d'eau de ruissellement pluvial

Attention : les techniques alternatives d'assainissement des eaux de ruissellement urbain (approche hydraulique) n'ont pas fait initialement l'objet de réflexion sur les impacts potentiels des rejets d'eaux de ruissellement sur le milieu récepteur (le sous-sol et les ressources en eaux souterraines).

La **fonction auto-épurative** des milieux naturels est souvent mise en avant. Mais son efficacité est difficilement évaluable et l'impact sur les écosystèmes souterrains et les nappes phréatiques est réel.

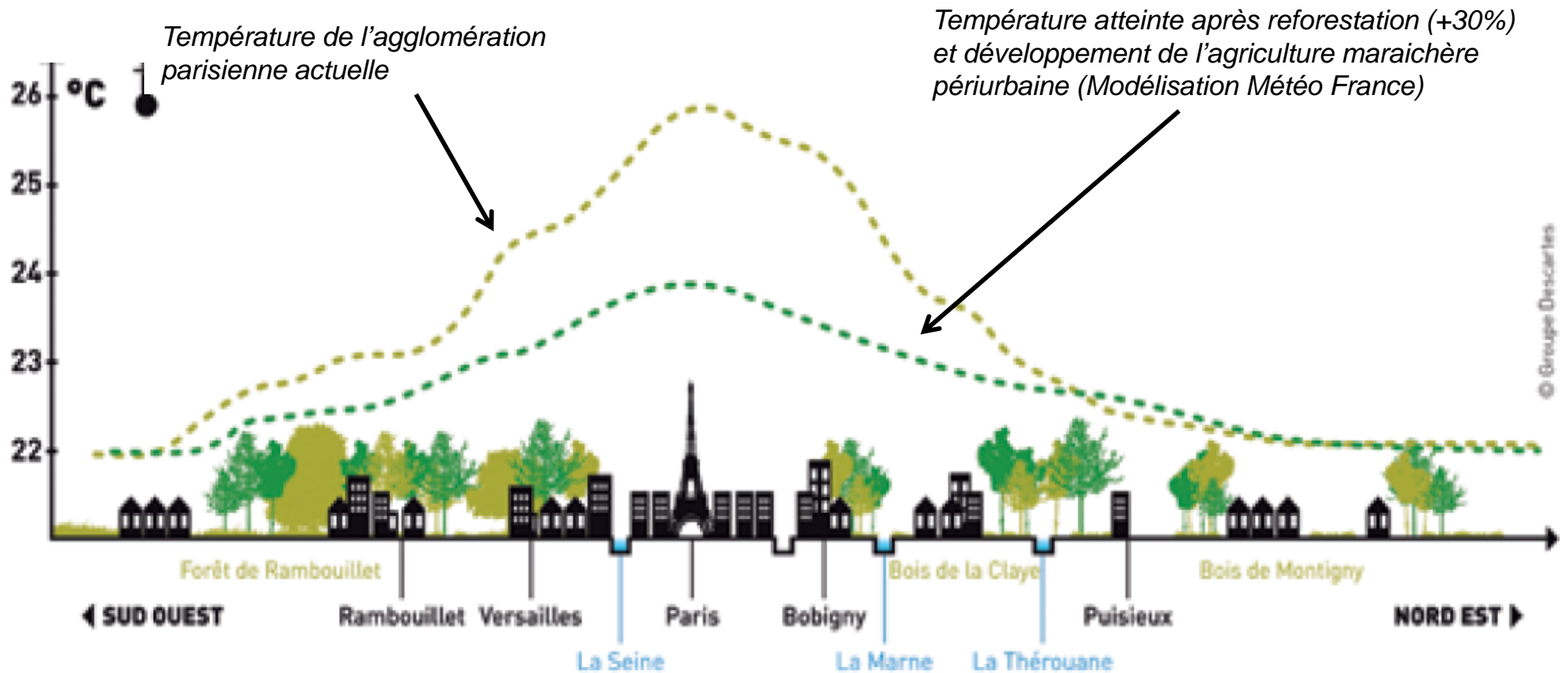
Milieu urbain : effet climatique

		Pécipitations	
Contaminants		Total	5-15% en plus
Noyau de condensation	10 fois plus	Jours avec moins de 5 mm	10% en plus
Particules	10 fois plus	Chute de neige dans la ville	5-10% en moins
Mélanges de gaz	5-25 fois plus	Chute de neige près de la ville	10% en plus
Radiation		Orages	10-15% en plus
Surface horizontale	0-20% en moins	Température	
Ultraviolet en hiver	30% en moins	Moyenne annuelle	0,5-3,0 °C en plus
Ultraviolet en été	5% en moins	Minimum en hiver	1-2 °C en plus
Durée d'ensoleillement	5-15% en moins	Maximum en été	1-3 °C en plus
Temps nuageux		Humidité relative	
Nuages	5-10% en plus	Moyenne annuelle	6% en moins
Brouillard en hiver	100% en plus	Hiver	2% en moins
Brouillard en été	30% en plus	Eté	8% en moins
		Vitesse du vent	
		Moyenne annuelle	20-30% en moins
		Coups de vent	10-20% en moins
		Calmes	5-10% en plus

Effets climatiques de l'urbanisation en comparaison avec les zones rurales (d'après Landsberg, 1981; Hollis, 1991)

Quelle est l'origine des phénomènes microclimatiques ?

- Les météorologues ont baptisé ce phénomène : « îlot de chaleur urbain ».
- Ecart de température plus marqué la nuit.
- Ce n'est dû ni à la pollution ni au CO2 ! En journée, alors qu'à la campagne l'énergie du soleil est utilisée pour l'évapotranspiration, les surfaces urbaines (toits, murs, bitume, etc.) reçoivent le rayonnement solaire et l'emmagasinent, puis le restitue la nuit.



Un bilan hydrique modifié

Couverture 0%

EVT : 45%

R : 10%

I : 50%



Couverture 15%

EVT : 38%

R : 20%

I : 42%



Couverture 40%

EVT : 35%

R : 30%

I : 35%



Couverture 90%

EVT : 30%

R : 55%

I : 15%



Une qualité modifiée

Références	Cd ($\mu\text{g/l}$)	Pb ($\mu\text{g/l}$)	Zn ($\mu\text{g/l}$)
Cheng et al., 1994	0,1-0,2 <i>0,1-0,2</i>	3,9-5,5 <i>2,9-4,4</i>	9-24 <i>8,2-21</i>
Mikkelsen et al., 1994	0,5-3 <i>0,2-0,9</i>	50-150 <i>10-45</i>	300-500 <i>180-350</i>
Chebbo, 1992	5,4-45 <i>0,1-0,5</i>	100-470 <i>5-23</i>	908-2000 <i>9,1-19</i>

- Variabilité en fonction des événements pluvieux
- Variabilité des concentrations
- Variabilité du ratio total/dissous (en gras concentrations totales, en italique concentrations dissoutes)

Sources de contamination des eaux pluviales urbaines (USEPA, 1999)

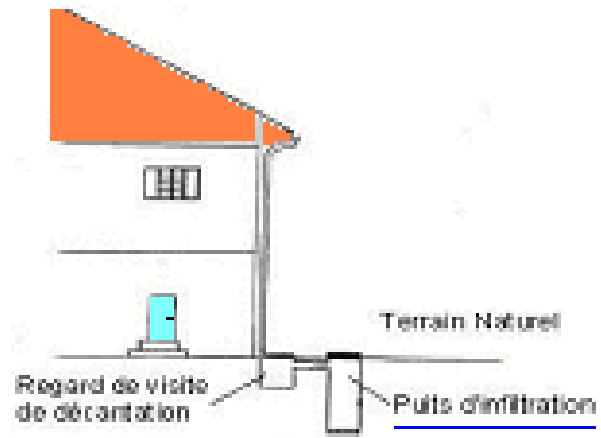
Contaminants	Sources de contamination
Sédiments	Rues, pelouses, routes, activités de construction, dépôts atmosphériques, drainage érosif
Pesticides et Herbicides	Pelouses résidentielles et jardins, bas cotés des routes, espaces des zones commerciales et industrielles, lessivage des sols
Matières organiques	Pelouses résidentielles et jardins, espaces des zones commerciales et industrielles, déjections animales
Métaux	Automobiles, ponts, dépôts atmosphériques, zones industrielles, érosion de sols, surfaces métalliques corrodées, produits de combustions
Hydrocarbures	Routes, parking, entrepôts de véhicules, stations service, déversement d'huile de vidange illicite
Bactéries et virus	Pelouses, routes, fuites de réseaux d'eaux usées, déjections animales fosses septiques
Nitrate et phosphore	Fertilisants de pelouses, dépôts atmosphériques, érosion des sols, déjections animales, détergent

L'exemple des matériaux de construction

Estimation des charges polluantes trouvées dans les eaux de ruissellement rapporté à la surface provenant de divers matériaux en $\mu\text{g}/\text{m}^2$ (d'après Quek and Forster, 1993; Davis et al., 2001)

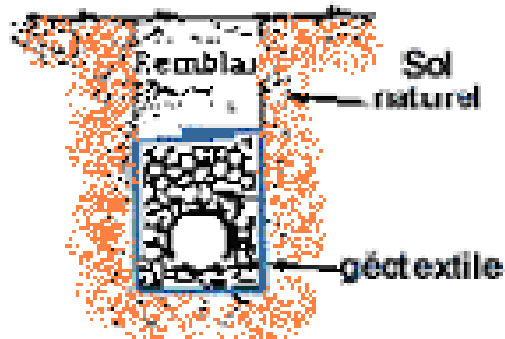
Matériaux	Pb	Cu	Cd	Zn
Briques de construction	300	47	1,4	2100
Bois peint	520	80	3,4	2800
Béton	26	35	0,3	1200
Bois non peint	93	120	0,6	330
Vernis	11	16	0,4	60
Tuile	30	261	0,3	40
Feutre bitumé	32	6,4	0,6	90
Zinc	32	24	1,2	38 279

Exemples gestion des EP par des techniques alternatives au « tout tuyau »

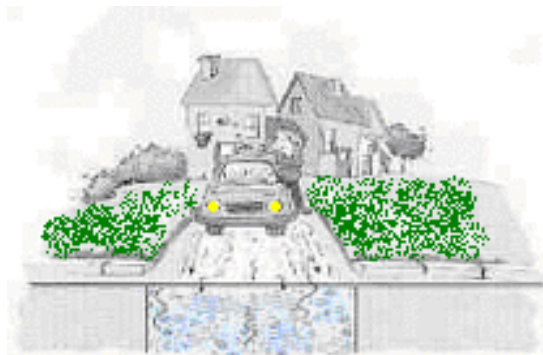


Les **puits d'infiltration** permettent de stocker et d'évacuer les EP directement dans le sol quand la couche superficielle est peu perméable.

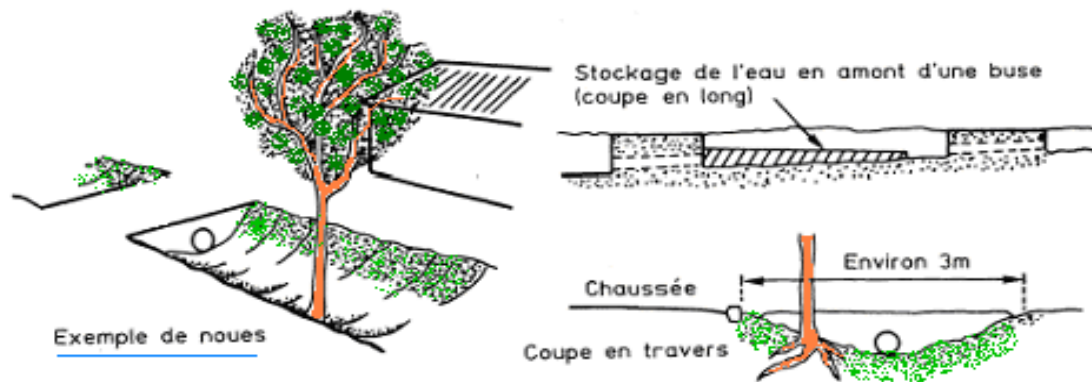
Tranchées drainantes



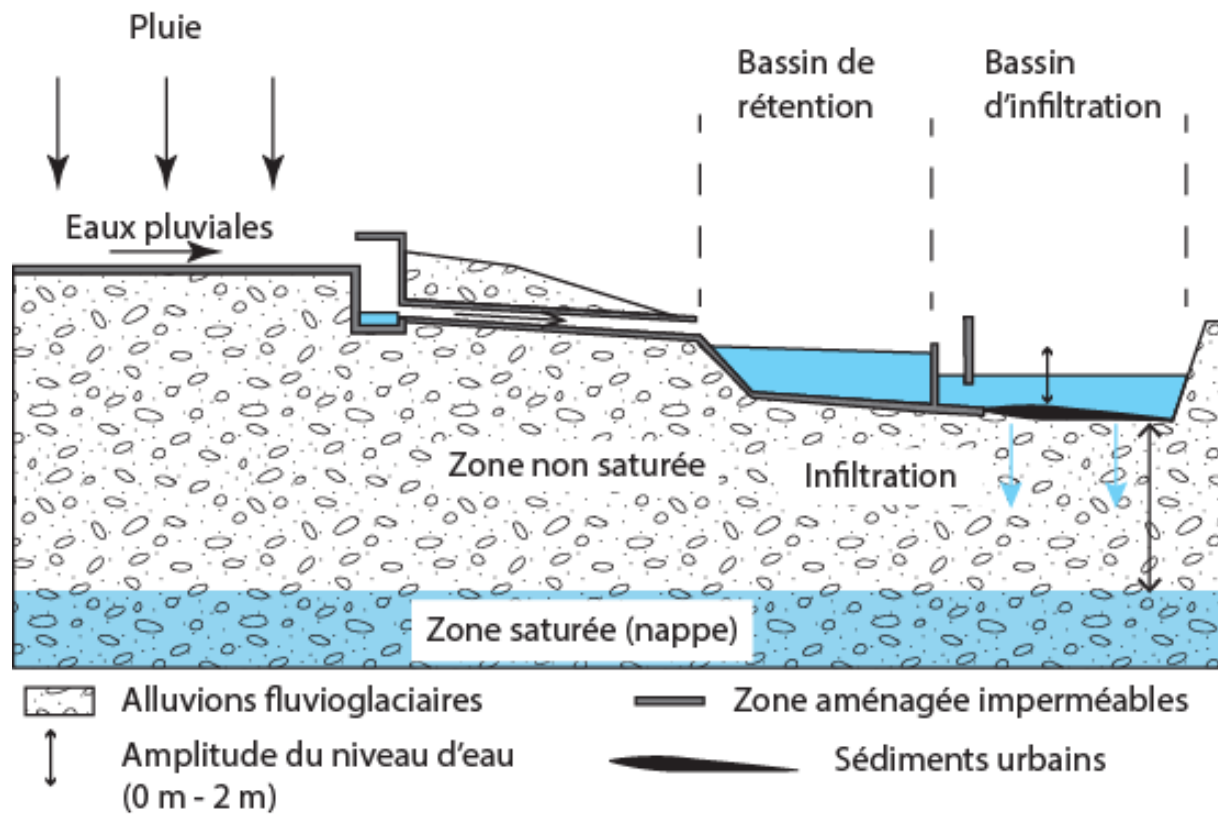
Les **tranchées drainantes** ou d'infiltration sont entièrement remplies de sables ou de graviers et sont alimentées par des drains



Les chaussées poreuses peuvent jouer directement un rôle sur la rétention des ETM lorsque ce sont des chaussées à revêtement poreux et les sols sont un lieu d'accumulation privilégié de ces éléments



Les noues d'infiltration



Les bassins d'infiltration

Les aquifères urbains

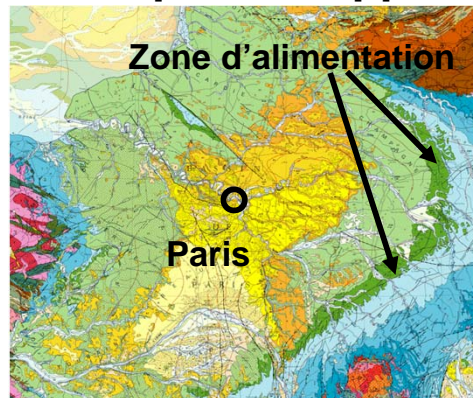
- Les eaux souterraines forment la quasi totalité des stocks d'eau liquide présents globalement dans les terres émergées (98 %)
- 60 % de toutes les ressources en eaux naturelles françaises. 7^{ème} rang de l'Europe communautaire pour la proportion d'eau souterraine utilisée
- Les **aquifères alluviaux** constituent des sites privilégiés car de faible profondeur, de forte productivité et de bonne qualité.
- Les grandes agglomérations localisées dans les plaines alluviales qui impliquent une énorme consommation en eau potable.

Quelques mots sur les aquifères

Un aquifère est une formation géologique :

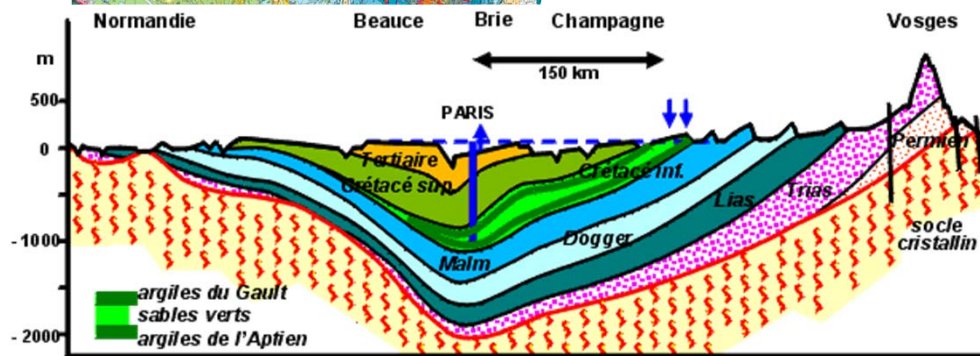
- constituée de terrains perméables (formations poreuses et/ou fissurées) : le « **contenant** » et qui contient de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable : le « **contenu** »,
- capable de restituer son contenu (eau) naturellement et/ou par exploitation (drainage, pompage,...).

Exemple de nappe captive urbaine

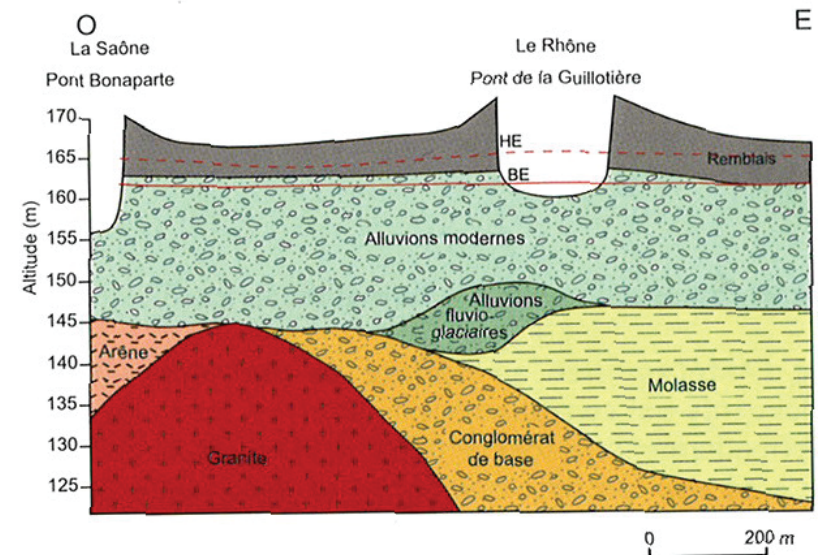


A environ 600 m de profondeur sous Paris, mais s'infiltré aux environs d'Auxerre.

Lors de son forage en 1841, elle était artésienne et jaillissait à environ 43 m au-dessus du sol, aujourd'hui l'eau doit être pompée en profondeur.

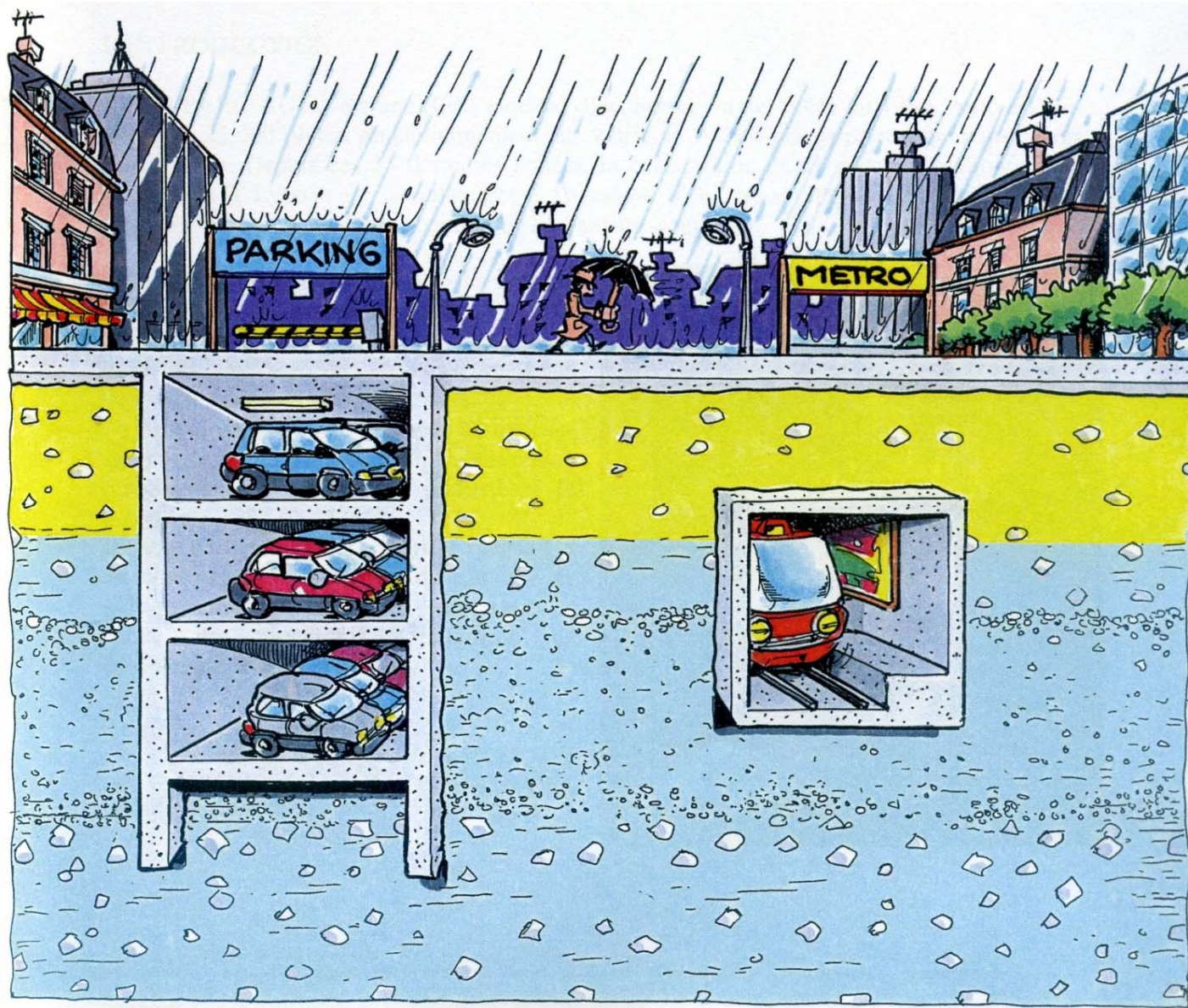


Exemple de nappe libre urbaine

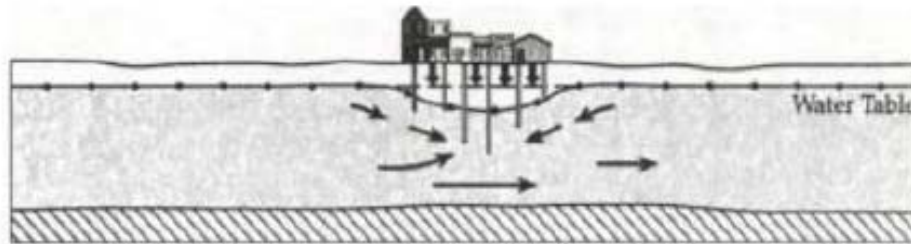


Coupe du Pont Bonaparte au Pont de la Guillotière, Lyon (BRGM, 1974)

Impact des infrastructures souterraines

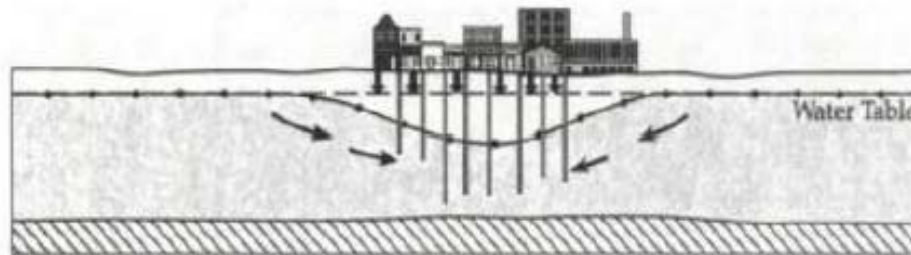


Niveau phréatique et croissance urbaine



Le village :

- Pompage des eaux souterraines peu profondes
- Pollution faible par les eaux usées infiltrées
- Eaux pluviales infiltrées ou cours d'eau



Le village devient une ville :

- Pompage plus importants, la nappe est plus profonde
- Risque de tassement
- Pollution plus importante par les eaux usées infiltrées
- Les eaux souterraines peu profondes sont polluées
- Expansion du réseau d'eaux pluviales

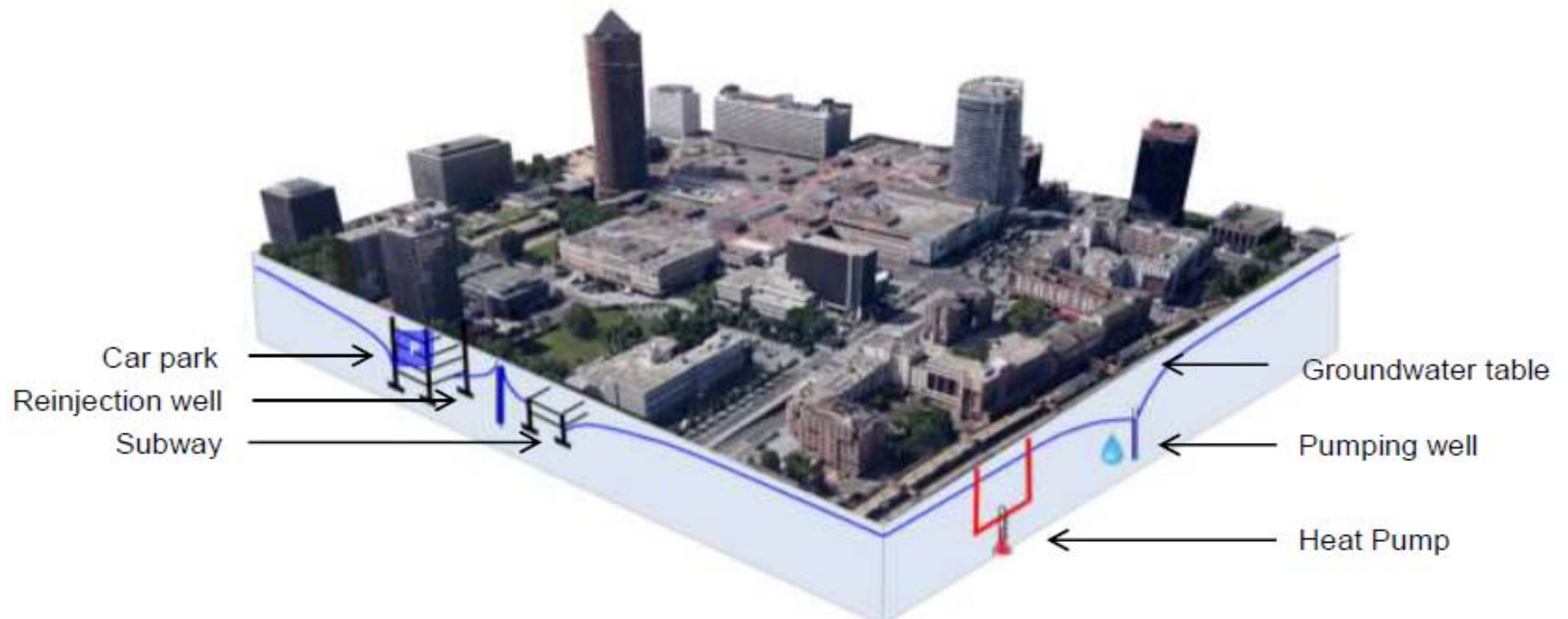


La ville devient une métropole:

- Des champs captant sont nécessaires à l'extérieur de la ville
- Importation d'eau
- Le niveau d'eau de la nappe remonte au centre de la ville : inondation des caves
- Expansion du réseau d'eaux pluviales

D'après Foster S. et al., 1998.

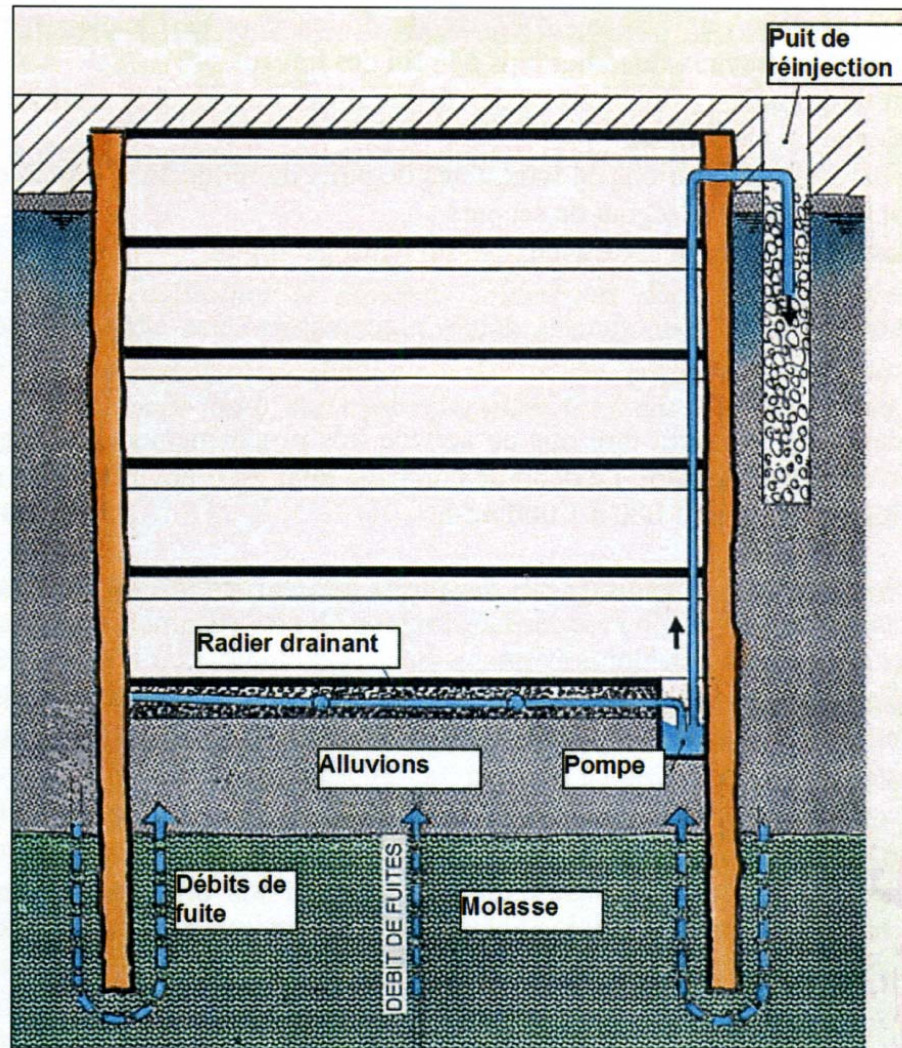
Le rôle des ouvrages souterrains sur la nappe de Lyon



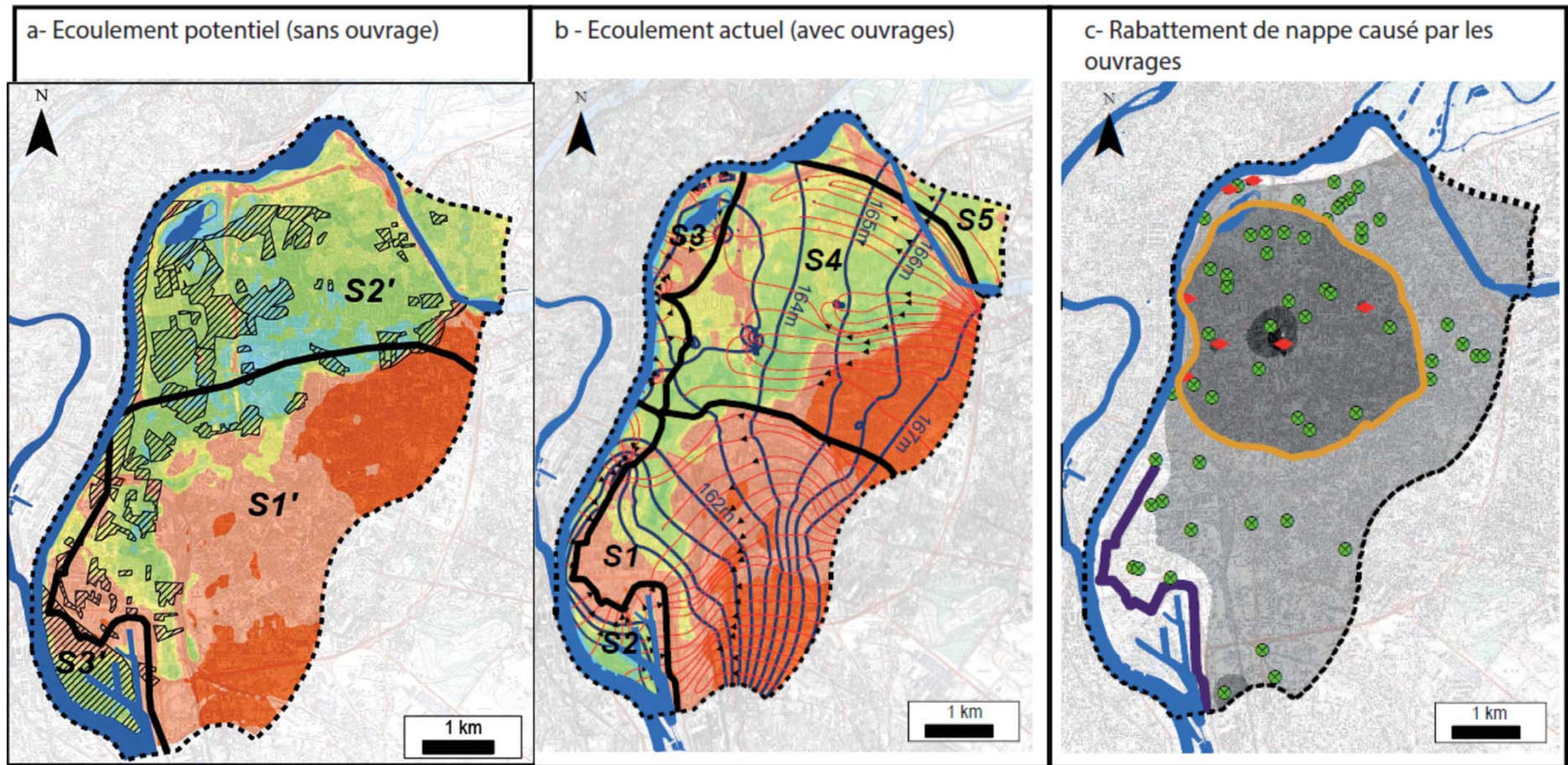
Contexte

- La densification urbaine conduit à la réalisation d'ouvrages de plus en plus profonds : métros, fondations de bâtiments, parkings souterrains.
- Le Grenelle de l'environnement a pour priorité un ralentissement de l'étalement urbain et favorisent ainsi le développement vertical (et donc souterrain) des villes
- En Europe, les aquifères urbains produisent environ 40% de l'eau distribuée dans les réseaux
- L'augmentation du nombre de puits géothermiques induit un réchauffement local de la nappe et perturbe ainsi son équilibre thermique, notamment dans le cas de l'agglomération lyonnaise
- Ces aquifères souffrent aujourd'hui d'un véritable déficit de protection qui se traduit par un manque de coordination pour l'exploitation des ressources souterraines, et des conflits d'usages
- Pas d'outils de planification souterrain de type « PLU urbain »
- Une mauvaise perception : les organisations enterrées sont « sécuritaires » ! (système informatique, cellule de crise, ...)

Exemple du parking de la Fosse aux Ours (Lyon)



Impact des ouvrages sur la nappe de Lyon



Légende

- Domaine d'étude
- Hydrographie
- Délimitation des systèmes
- Ligne de courant

Profondeur de la nappe [GWTd]

- | | |
|------------------|-------------------|
| 0 m < GWTd < 1 m | 4 m < GWTd < 5 m |
| 1 m < GWTd < 2 m | 5 m < GWTd < 10 m |
| 2 m < GWTd < 3 m | 10 m < GWTd |
| 3 m < GWTd < 4 m | |

Ouvrages souterrains

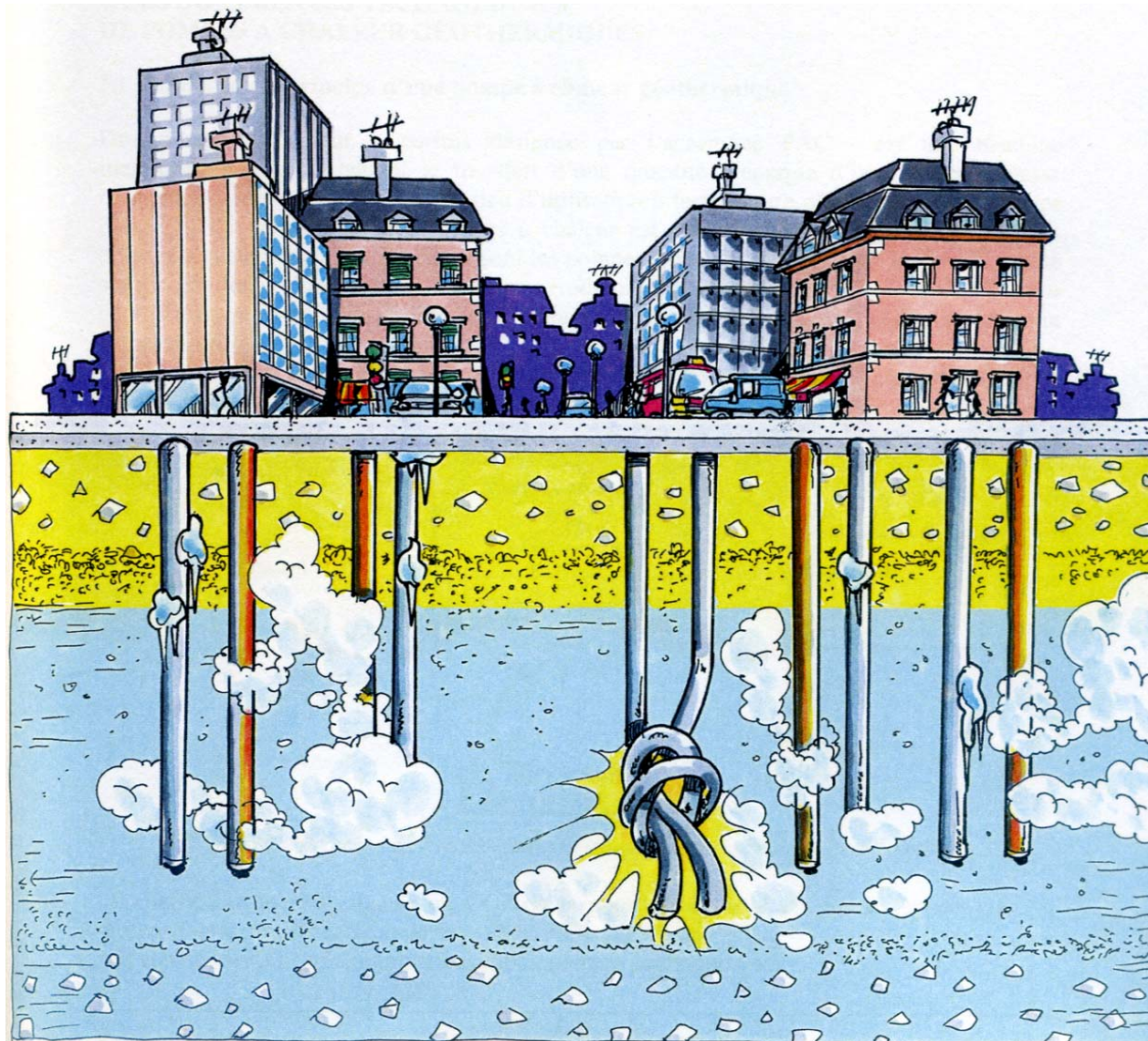
- Ouvrage équipé de radier drainant
- Puits de pompage
- Drain

Rabattement [R]

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| R > 3 m | R < 0.5 m |
| 2 m < R < 3 m | Zone la plus impactée |
| 1 m < R < 2 m | |
| 0.5 m < R < 1 m | |

Attard, et al., 2016

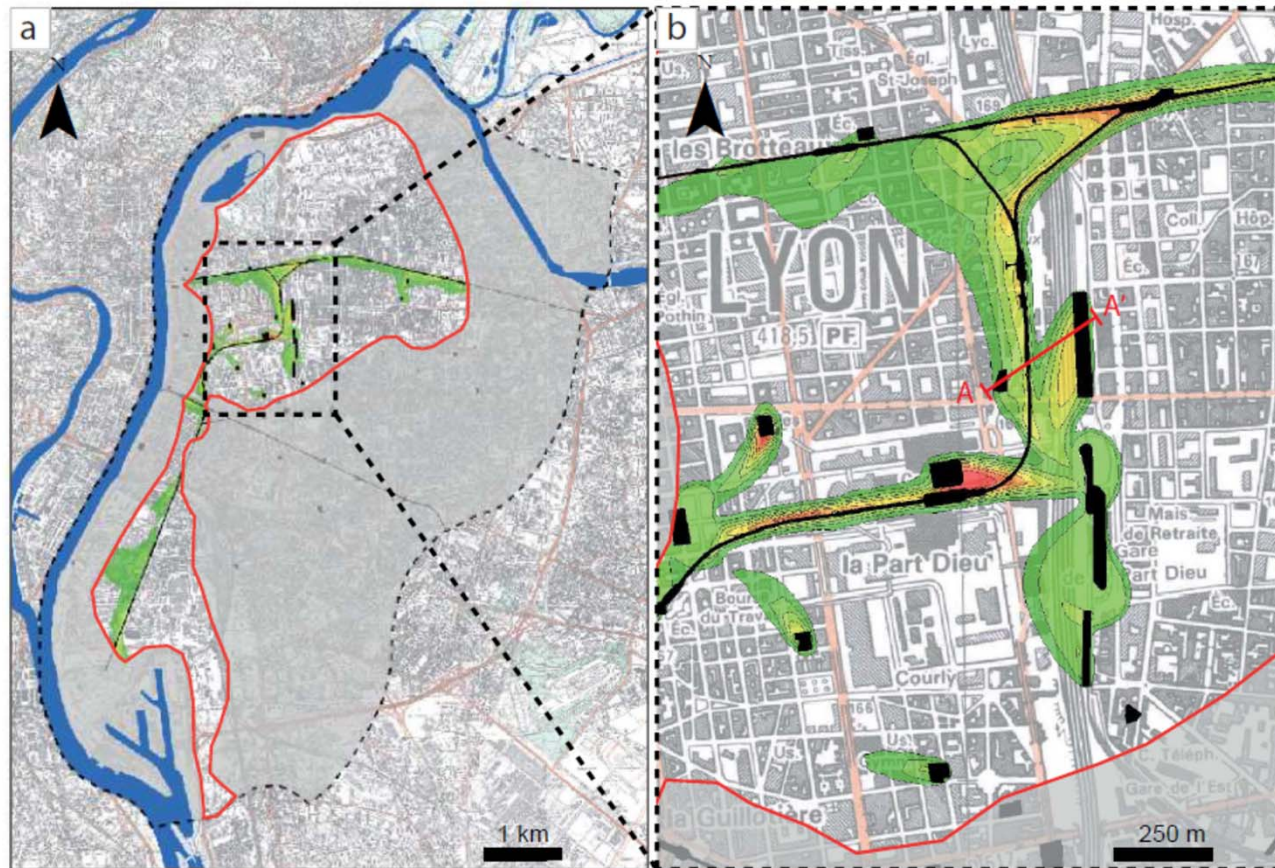
Impact thermique (pompe à chaleur, climatiseur, ...)



La géothermie à Lyon

- Environ 130 installations : rejet soit la nappe (107 unités), soit les égouts (15 unités), soit les eaux superficielles (8 unités).
- Forte concentration sur deux secteurs : Presqu'Île et Part-Dieu : interférences entre installations.
- La principale modification physique est la température :
 - ✓ Température initiale de l'aquifère : environ 15 ° C.
 - ✓ Diminution à 5 à 8 °C au point de rejet en contexte de chauffage
 - ✓ Augmentation jusqu'à 30 °C au voisinage du forage de réinjection en contexte de climatisation
- Le sous-sol renferme une nappe libre peu profonde très favorable : en moyenne 8 installations/an implantées ces quinze dernières années.
- Doublet de forage, l'un pour capter l'eau et l'autre pour la réinjecter. Les pompes fonctionnent majoritairement en mode climatisation. Ce sont donc surtout des rejets chauds qui influencent les températures de la nappe.
- Ainsi, la ville de Lyon se trouve confronté à certaines questions :
 - ✓ Le risque de désaturation des terrains suite à l'exploitation de l'espace et de la géothermie ;
 - ✓ Les problèmes de concurrence hydrogéologique entre les usages de l'espace, de la géothermie et de l'eau souterraine ;

Impact thermique des ouvrages souterrains à Lyon



Légende

Domain d'intérêt

Hydrographie

Réchauffement δ [°C]

$0.5 \leq \delta < 1$

$1 \leq \delta < 1.5$

$1.5 \leq \delta < 2$

$2 \leq \delta < 2.5$

$2.5 \leq \delta < 3$

$3 \leq \delta < 3.5$

$3.5 \leq \delta < 4$

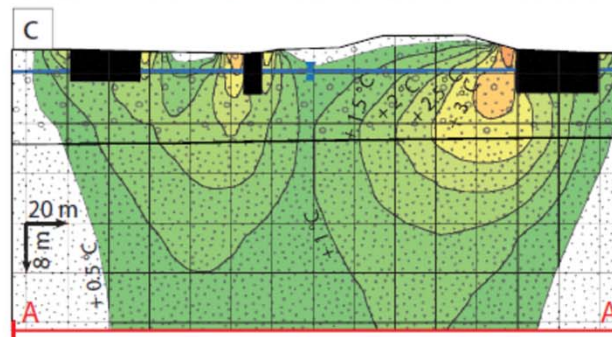
$4 \leq \delta < 4.5$

$4.5 \leq \delta < 5$

Ouvrage souterrain

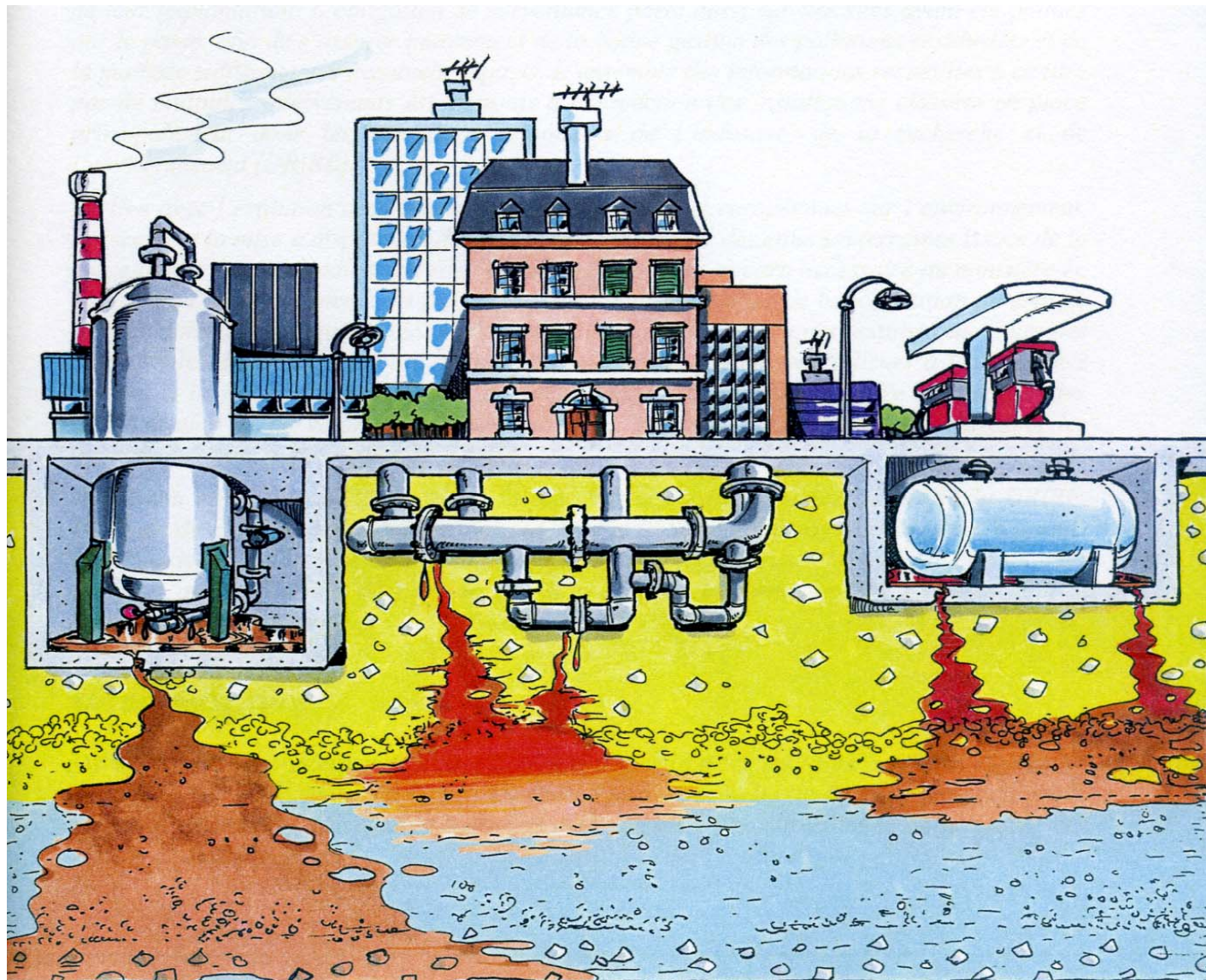
Alluvions modernes

Molasse

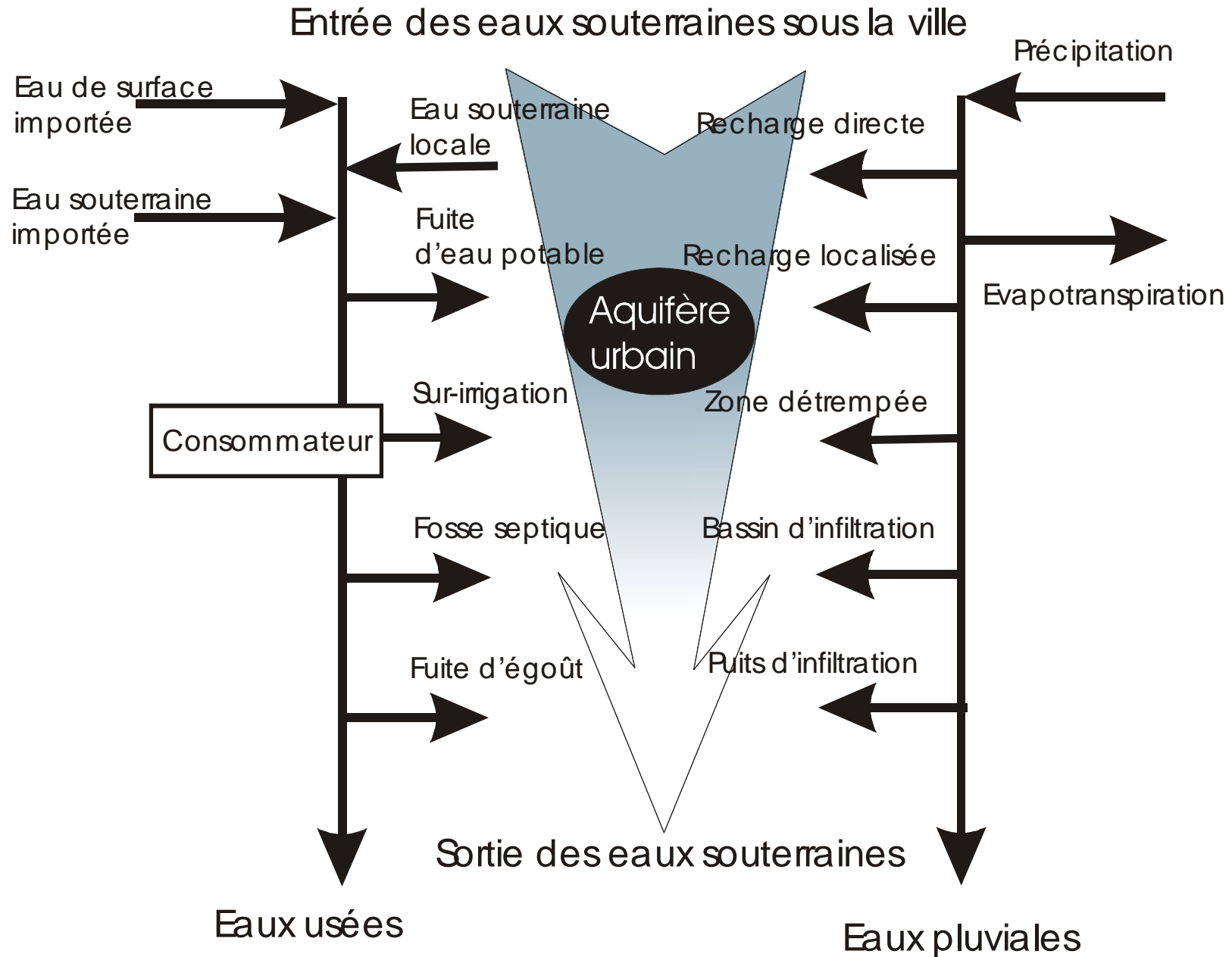


Attard, et al., 2016

Multiple sources de pollution sur les eaux souterraines urbaines



Conséquences sur les aquifères



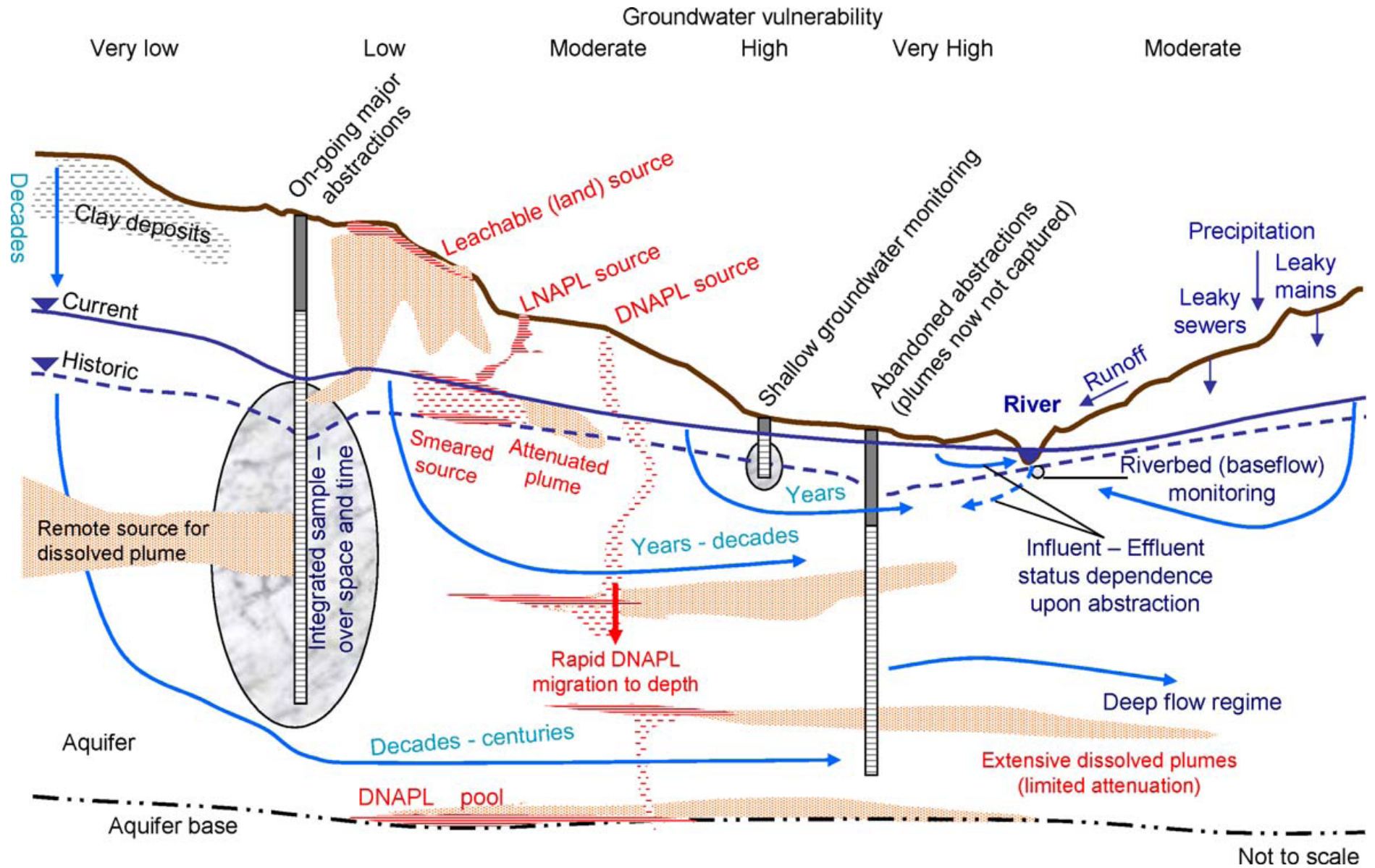
Principales sources de pollution des eaux souterraines

Pollutions accidentelles	Pollutions chroniques
<ul style="list-style-type: none">■ Pollution atmosphérique accidentelle massive■ Inondations■ Alimentation par un cours d'eau accidentellement pollué■ Infiltration des eaux d'extinction d'incendie■ Fuites de conduites ou de cuves de produit chimiques et pétroliers■ Rejets illicites de produits polluants■ Accidents de transport routier ou ferroviaire■ ...	<ul style="list-style-type: none">■ Pollutions atmosphériques chroniques■ Epanchage d'engrais, de produits phytosanitaires, de lisiers, de bues de station d'épuration. . .■ Alimentation par un cours d'eau polluée■ Fuites des réseaux d'assainissement■ Systèmes d'assainissement autonome défectueux Décharges, terrils, dépôts mal conçus (fuites ou lessivage par la pluie)■ Rejets souterrains d'effluents industriels■ Désherbage chimique et infiltration des eaux de ruissellement des réseaux ferroviaires, routiers et autoroutiers■ ...

De nombreux cas de contamination

Année	Ville / région	Polluants
1969	Stockholm	NO ₃
1974	Chicago	SO ₄ , Cl
1977	Jaipur	Cl, Fe, DCO
1980	Halifax	Cl
1980	Merida	Bactéries
1980	Milwaukee	Cl, SO ₄ , bactéries
1980	Nassau County	NO ₃
1980	Long Island	Métaux lourds
1996	Denver	SO ₄ , HCO ₃
1997	Niaméy	NO ₃
2001	Tel Aviv	NO ₃
2001	Taejon	Cations majeurs, Cl ⁻ , SO ₄
2002	Sana'a	Cl, NO ₃ , NH ₄
2003	Nottingham	Bactéries

L'exemple de l'aquifère de Birmingham (UK)



Conclusion

- Le sous sol des villes n'est pas statique, il est sans cesse en évolution. Paris doit beaucoup à Napoléon, qui, par décret mit un terme à l'exploitation des carrières qui se poursuivait sous les rues depuis l'époque des Romains.
- Mexico s'est affaissé de plusieurs mètres depuis 1909 et dans l'ancienne ville de Prague c'est l'inverse qui se produit. Une grande partie de la surface du terrain se trouve au-dessus du niveau original du sol, en raison de l'accumulation de débris de maçonnerie.
- Dans les zones urbanisées, la composante souterraine n'est souvent visible que lors d'excavations importantes ou lorsque surviennent des problèmes d'effondrement, de glissement, de stabilité, de tassement, d'inondation, d'approvisionnement en eau potable, de gestion des déchets ou de pollution.
- Par ailleurs, la réaffectation des friches industrielles se pose le plus souvent en secteur urbain. Une gestion harmonieuse des ressources du développement urbain passe obligatoirement par l'étude des mécanismes de prise en charge de la pollution par le sous sol de la ville.
- Ainsi le développement durable du milieu souterrain des villes est un défi majeur.