

La science d'hydrogéologie : importance, défis et opportunités



Philip Brunner,
Université de Neuchâtel, Centre l'Hydrogéologie et de Géothermie

EAU REQUIS POUR LA PRODUCTION DE:

1 cafe:



1 kilo de boeuf:



1 verre de vin:



1 t-shirt:



1 voiture:



1 tomate:

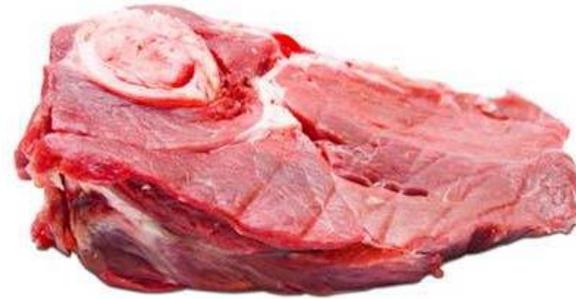


EAU REQUIS POUR LA PRODUCTION DE:

1 cafe: 140 l



1 kilo de boeuf: 15'000 l



1 verre de vin: 120 l



1 t-shirt: 2700 l



1 voiture: 150'000



1 tomate: 180 l



Source: www-waterfopotprint.org

Introduction

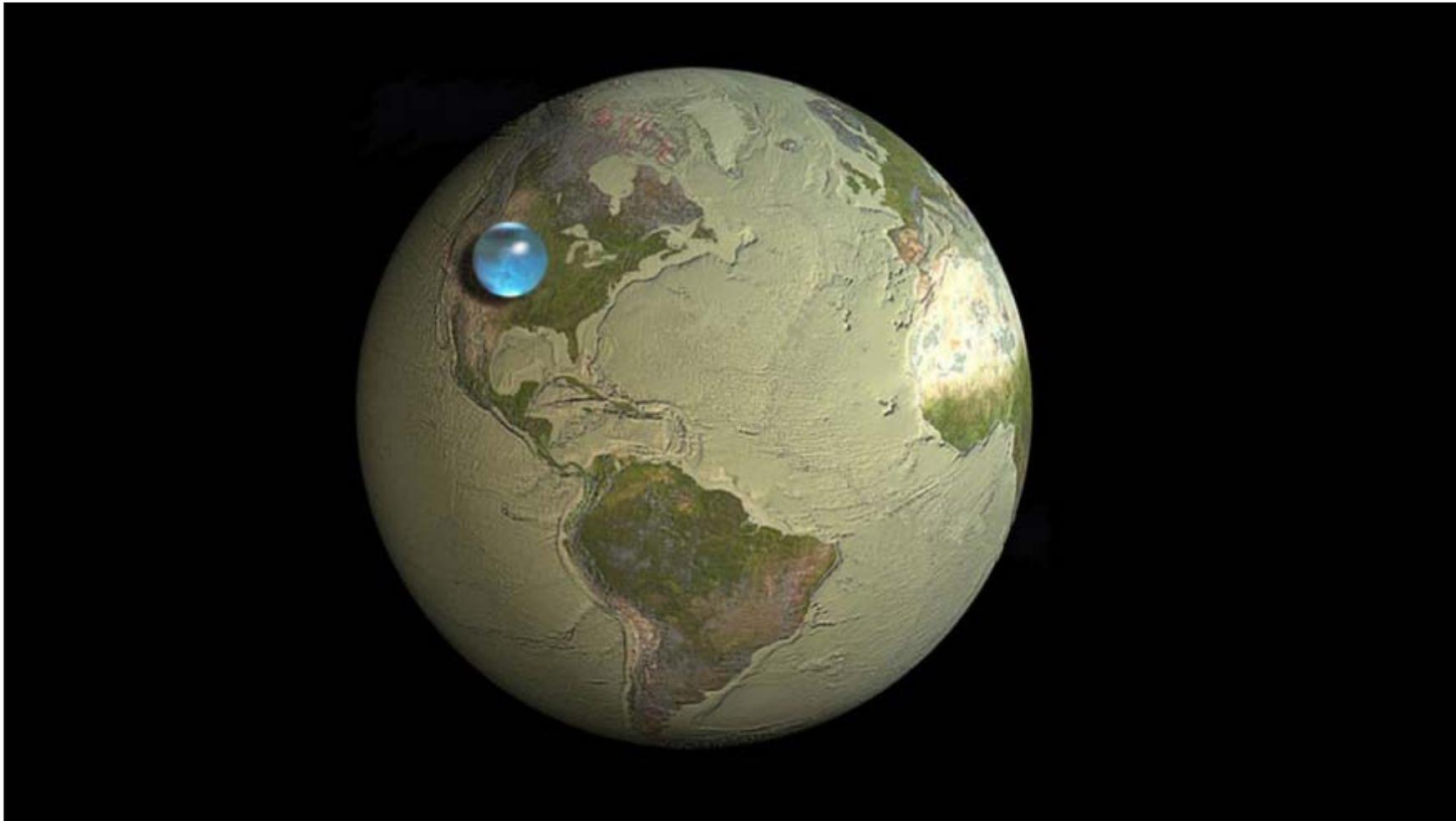
- « Water challenges »
 - Insuffisance
 - Excès
 - Pollution
- Un peu d'histoire du cycle de l'eau

Hydrogéologie

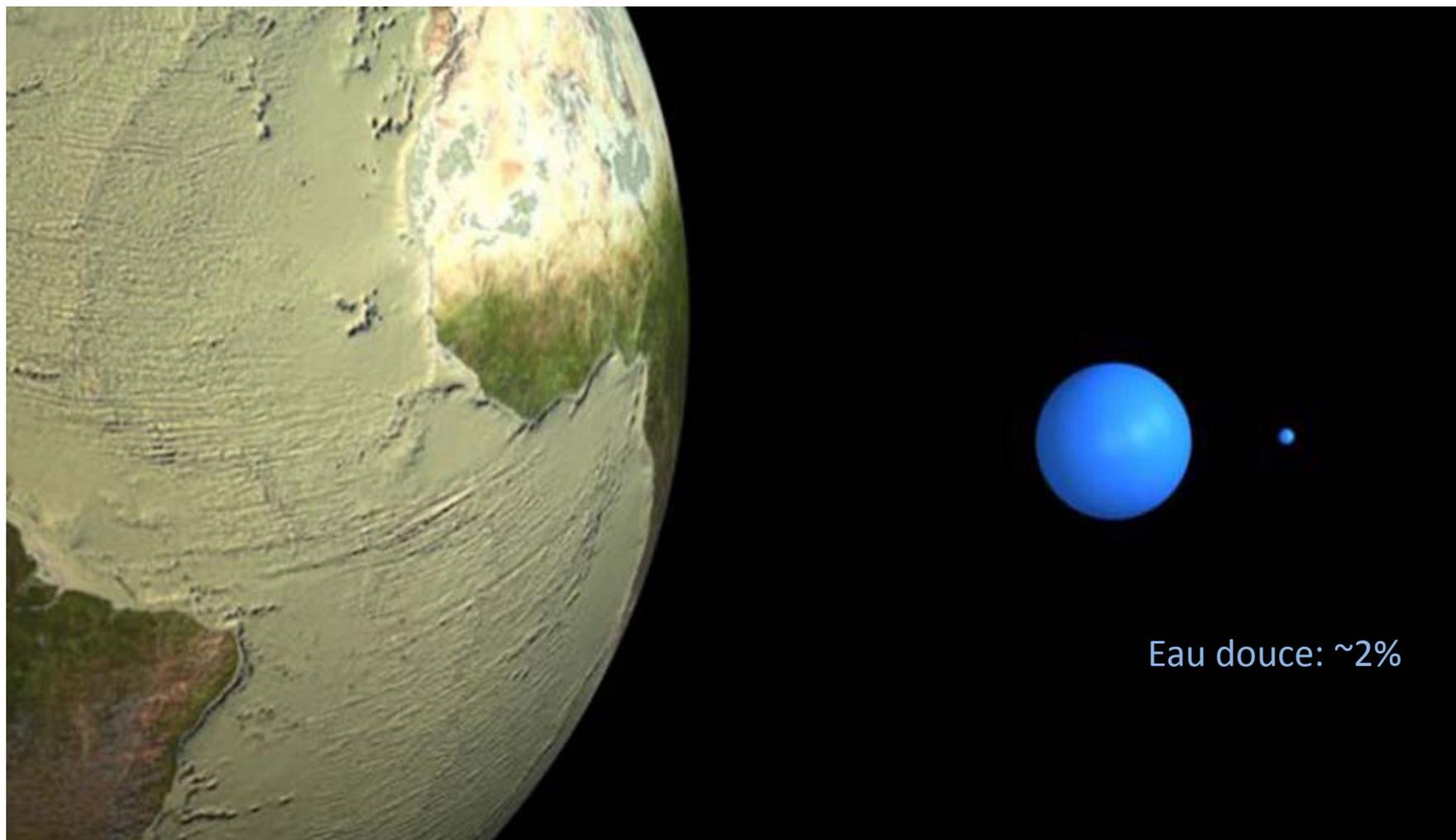
- Eau souterraine: Quelques définitions
- Type d'aquifères
- Recharge, débit, gestion
- Bilan hydrique
- Cas d'études (Botswana)

~1.4 milliards km³

RESSOURCES GLOBALES EN EAU: ~1.4 MILLIARDS KM³



Howard Perlman, [USGS](#)



Howard Perlman, [USGS](https://www.usgs.gov/)



~ 1.0 % **Eau de surface** : Accessible

~ 30 % **Eau souterraine** : la ressource en eau douce disponible la plus importante

~ 69 %

Glaciers et calottes polaires : Pas accessible

Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources.

Pesticides, salinisation, résidus de médicaments.....



<http://www.treehugger.com/corporate-responsibility/half-of-all-chinas-water-too-polluted-to-drink.html>

Echantillons d'eau en Chine



Perturbateurs endocriniens en Suisse

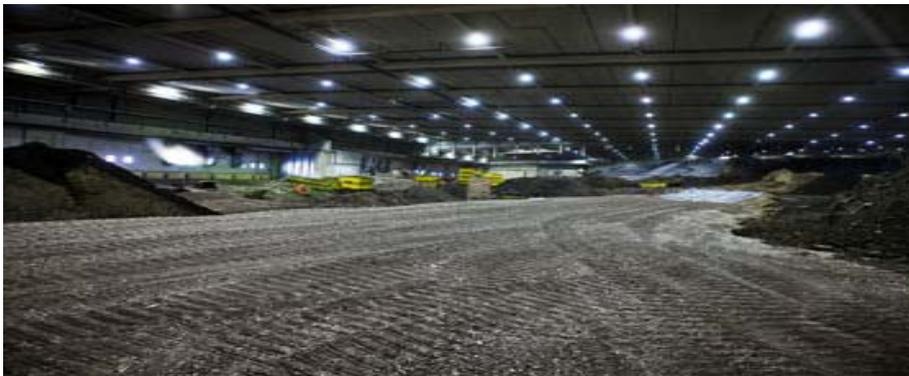
Substances problématiques pour l'eau souterraine (exemples):

- Substances organiques: surtout des hydrocarbures chlorés
Contaminations ponctuelles: décharges
- Métaux lourds et industries
- Pesticides Contaminations diffuses: Agriculture
- Micro-organismes: bactéries, virus et protozoaires pathogènes
- Nitrates
- Salinization



POLLUTION DES RESSOURCES EN EAU DOUCE

Exemples ponctuels : Kölliken: \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$.....



<http://www.smdk.ch/>

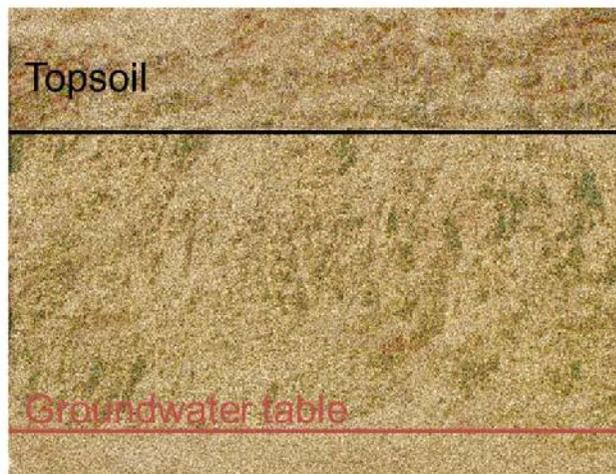
Salinisation des surfaces agricoles

Evaporation directe à travers la zone non saturée

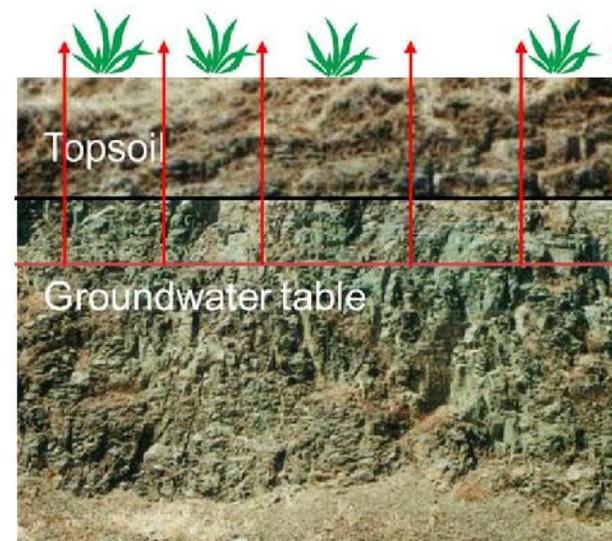
Occurrence:

- Point bas des bassins: associé à la salinité
- Irrigation

Before Irrigation:



After several years of irrigation:



Images: P. Brunner

Salinisation des surfaces agricoles

Evaporation directe à travers la zone non saturée

Occurrence:

- Point bas des bassins: associé à la salinité
- Irrigation

Terrain abandonné dû à la salinisation (Yanqi basin, Western China)



Image: P. Brunner

Excès et insuffisance

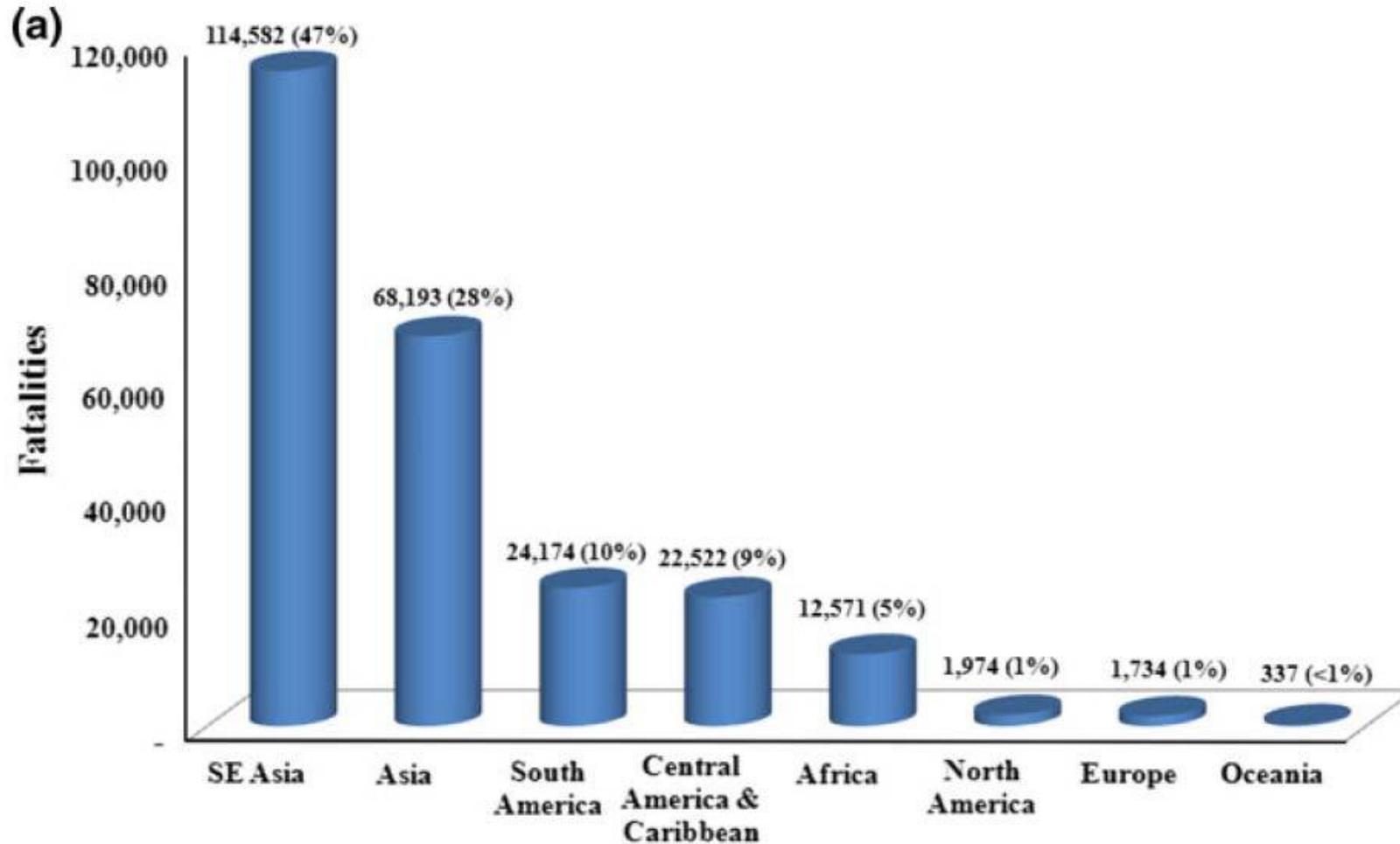


Images: W. Kinzelbach

DISTRIBUTION DES RESSOURCES EN EAU

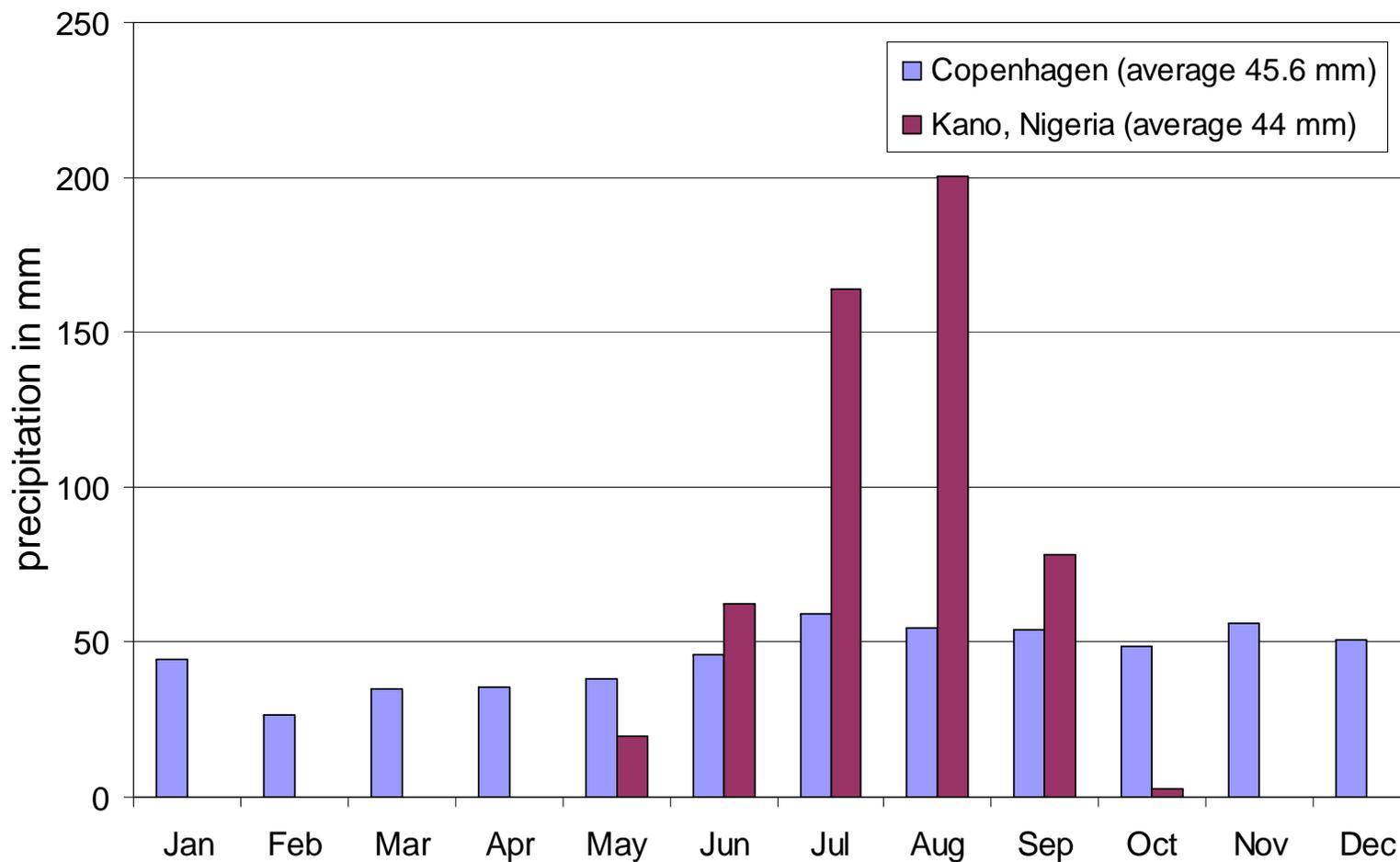


MORTALITÉ DUE AUX INNONDATIONS (1998-2008)

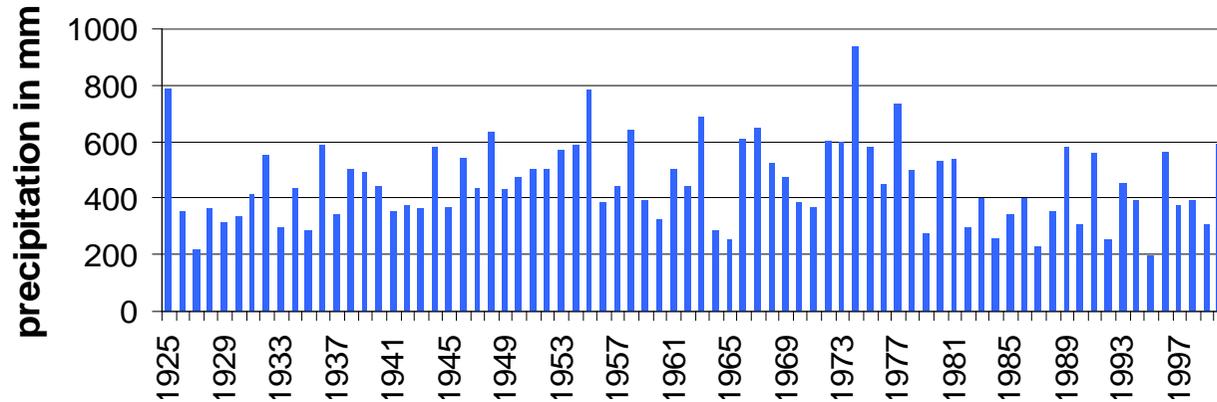


Adhikari et al., 2010

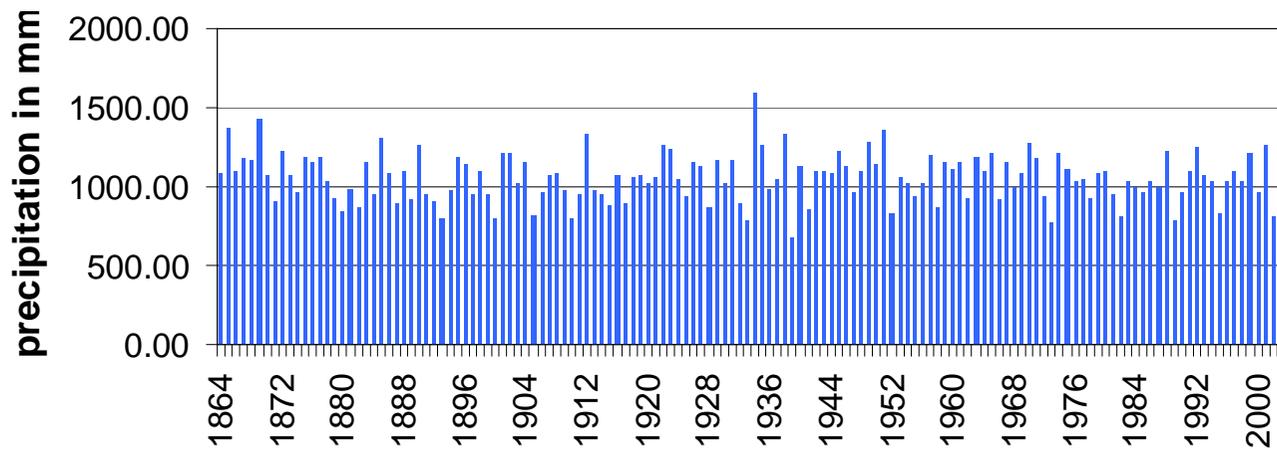
DISTRIBUTION DES RESSOURCES EN EAU



DISTRIBUTION DES RESSOURCES EN EAU

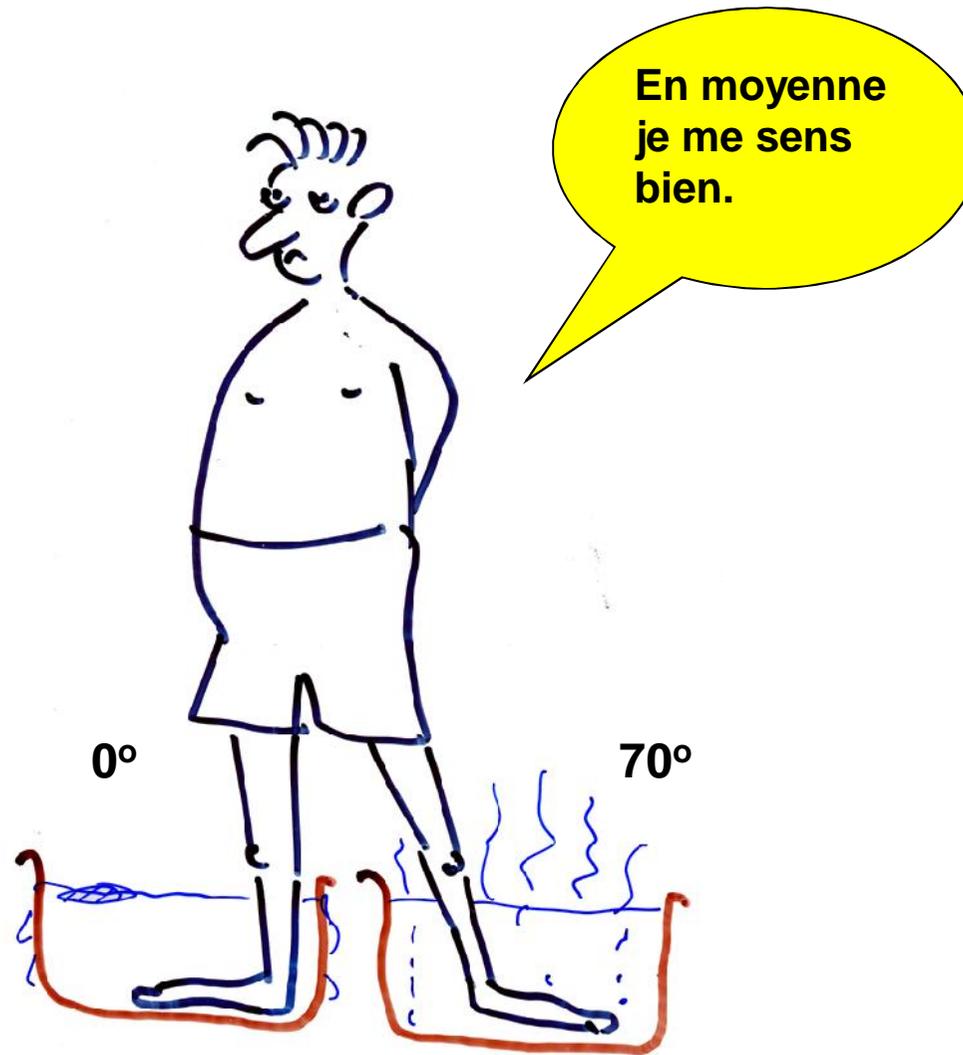


Maun,
Botswana



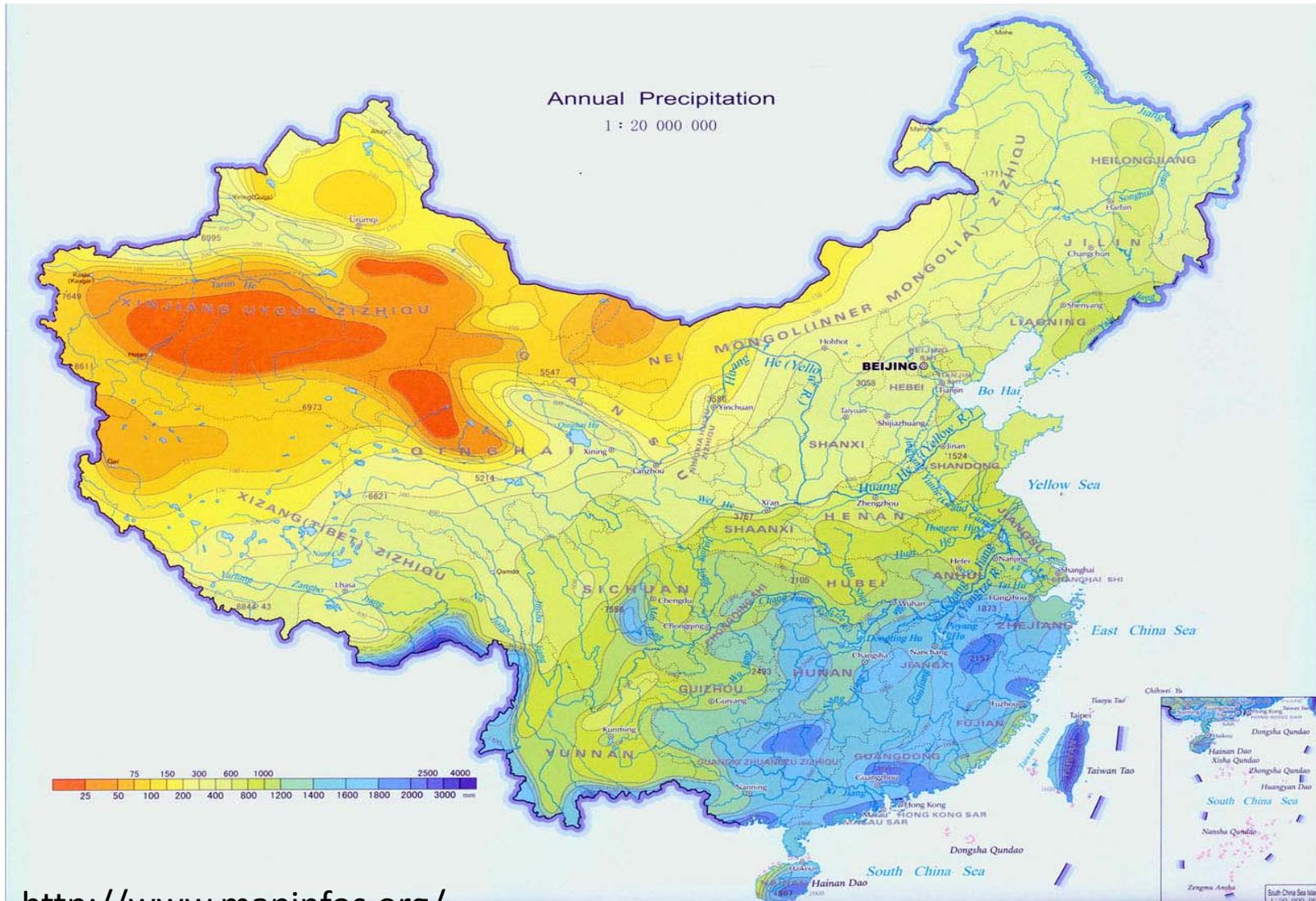
Zürich,
Switzerland

W. Kinzelbach



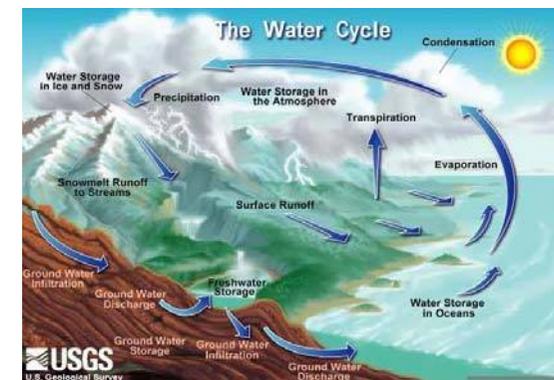
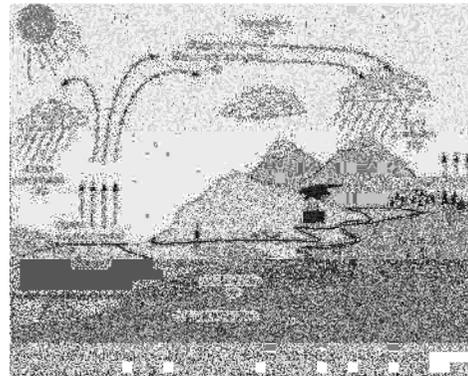
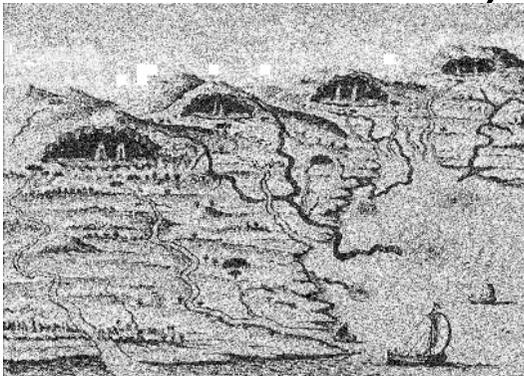
W. Kinzelbach

DISTRIBUTION DES RESSOURCES EN EAU

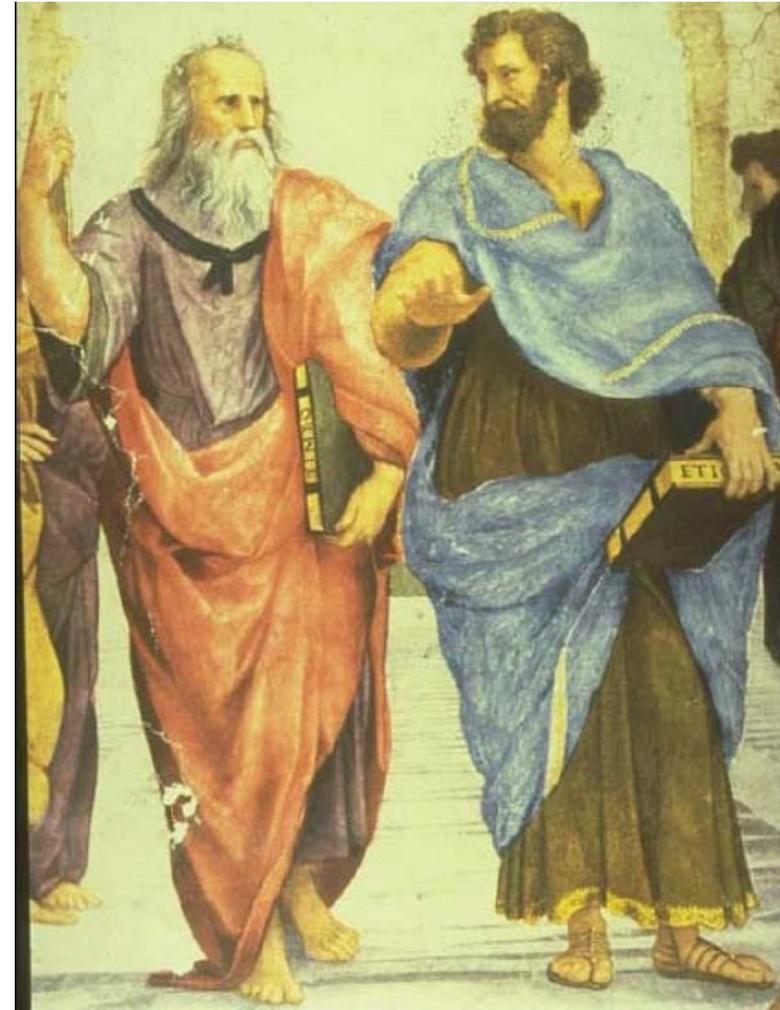


CYCLE DE L'EAU (CYCLE HYDROLOGIQUE)

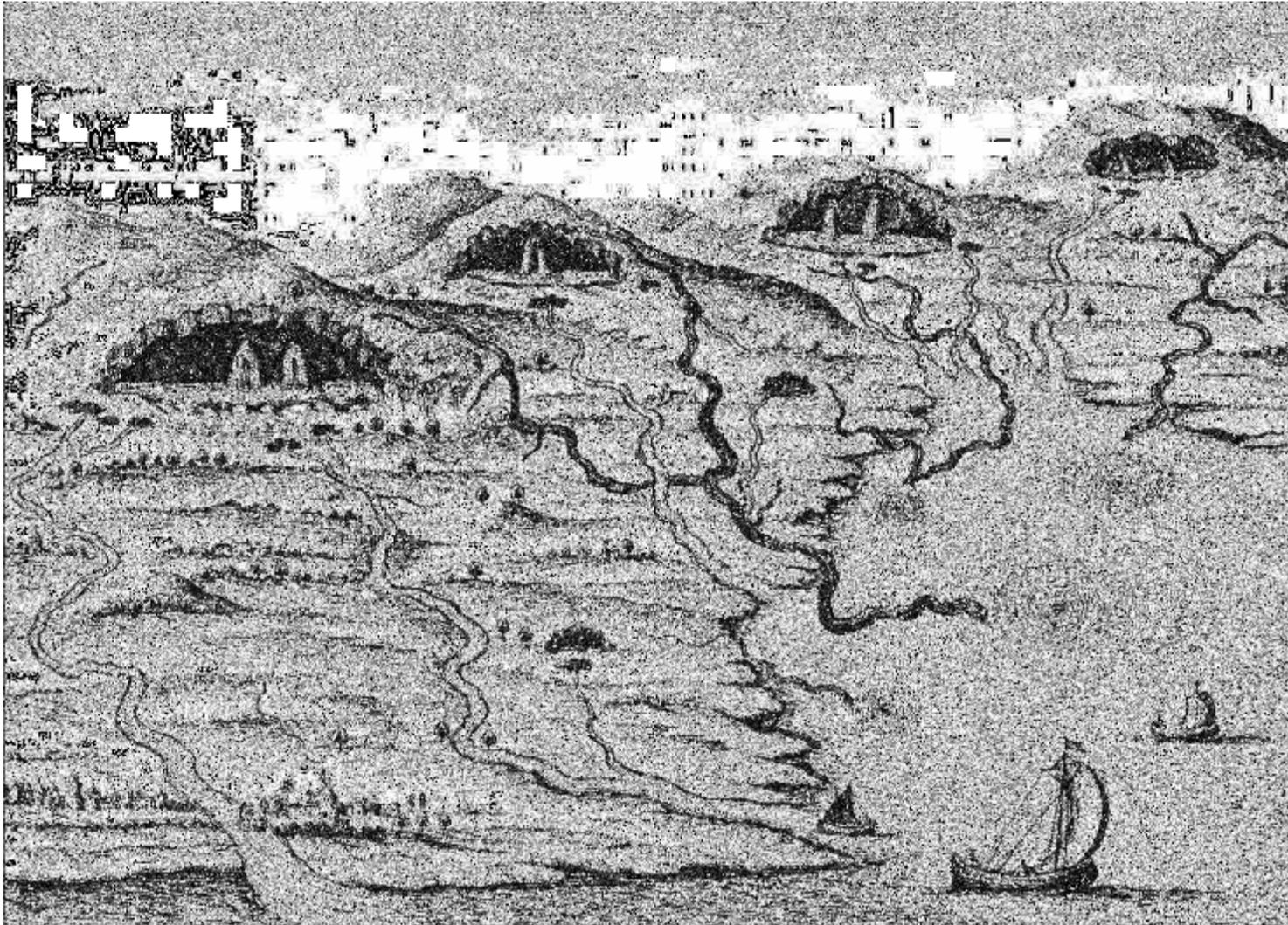
- Définition: **Le cycle hydrologique** est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre.
- Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement séquentiellement, mais sont aussi simultanés. Le cycle hydrologique n'a ni commencement, ni fin.



- Platon et d'autres philosophes grecs croyaient que les sources et les rivières étaient issues du transport souterrain d'eau de mer purifiée.
- Aristote compléta cette théorie en suggérant un transport gazeux de l'eau à travers des grottes à partir de la mer et une condensation au niveau des sources.
- Mise à part quelques exceptions ces théories ont été retenues jusqu'au XVII^e siècle !



Plato (gauche), The School of Athens, Raphael, 1509



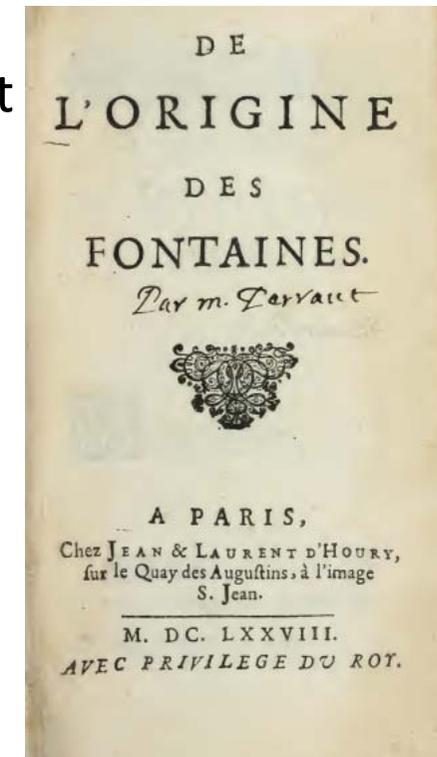
Athanasius Kircher (1601-1680)



“Itinera alpina”, Johann Jakob Scheuchzer (1672-1733)

La première personne à démontrer que les écoulements de surface été issus des précipitations fut Pierre Perrault en 1674 : De l'origine des fontaines

- Précipitations mesurées pendant 3 ans près de Paris
- Estimation du débit de la partie amont de la Seine
- Multiplication des précipitations par la surface du bassin versant : volume total 6 fois plus grand que l'écoulement de surface
- **Conclusion**
 - Les précipitations sont plus que suffisantes pour être à l'origine des écoulements de surface.



- Le travail de Perrault fut fortement appuyé par Edme Mariotte
 - Même expérience, mais techniques différentes
 - Grande partie du bassin versant de la Seine
 - Marriott suggéra que les eaux de percolation se déplacent latéralement, alimentant les sources, les aquifères et les puits.
- En 1693, Edmund Halley mesura l'évaporation
 - Démontrant que l'évaporation de l'eau de mer est suffisante pour être à l'origine des précipitations



1620-1694



1656-1741

Images: http://asor.free.fr/celebrite-plongee/celebrites_plongee.shtml# et wikipedia (Halley)

LE CYCLE DE L'EAU



En 1856, Henry Darcy décrit l'écoulement de l'eau souterraine en 1D comme suit:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl}$$

Q : débit des eaux souterraines [L^3T^{-1}]

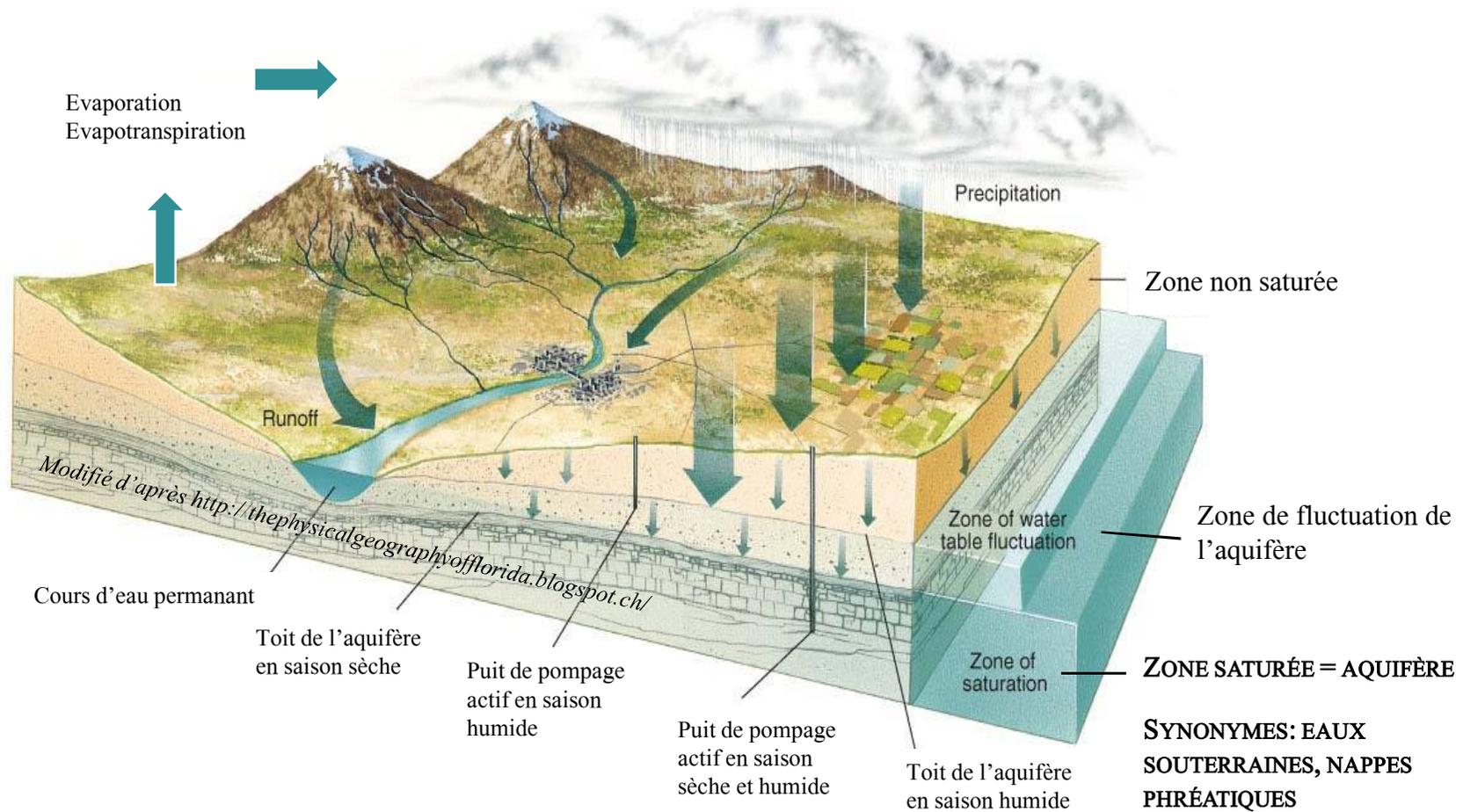
K : conductivité hydraulique [LT^{-1}]

A : aire de la section transversale de l'aquifère perpendiculaire à l'écoulement [L^2]

dh/dl : gradient hydraulique [-]

- K est un coefficient de proportionnalité qui relie le débit des eaux souterraines au gradient hydraulique.
- K dépend des propriétés du milieu poreux et des propriétés du fluide

CYCLE DE L'EAU



US Geological Survey

- L'hydrologie c'est...

- L'étude de l'eau, sa répartition, son abondance et sa dynamique dans le système terrestre (air, terres émergées, océan).

- L'hydrogéologie c'est...

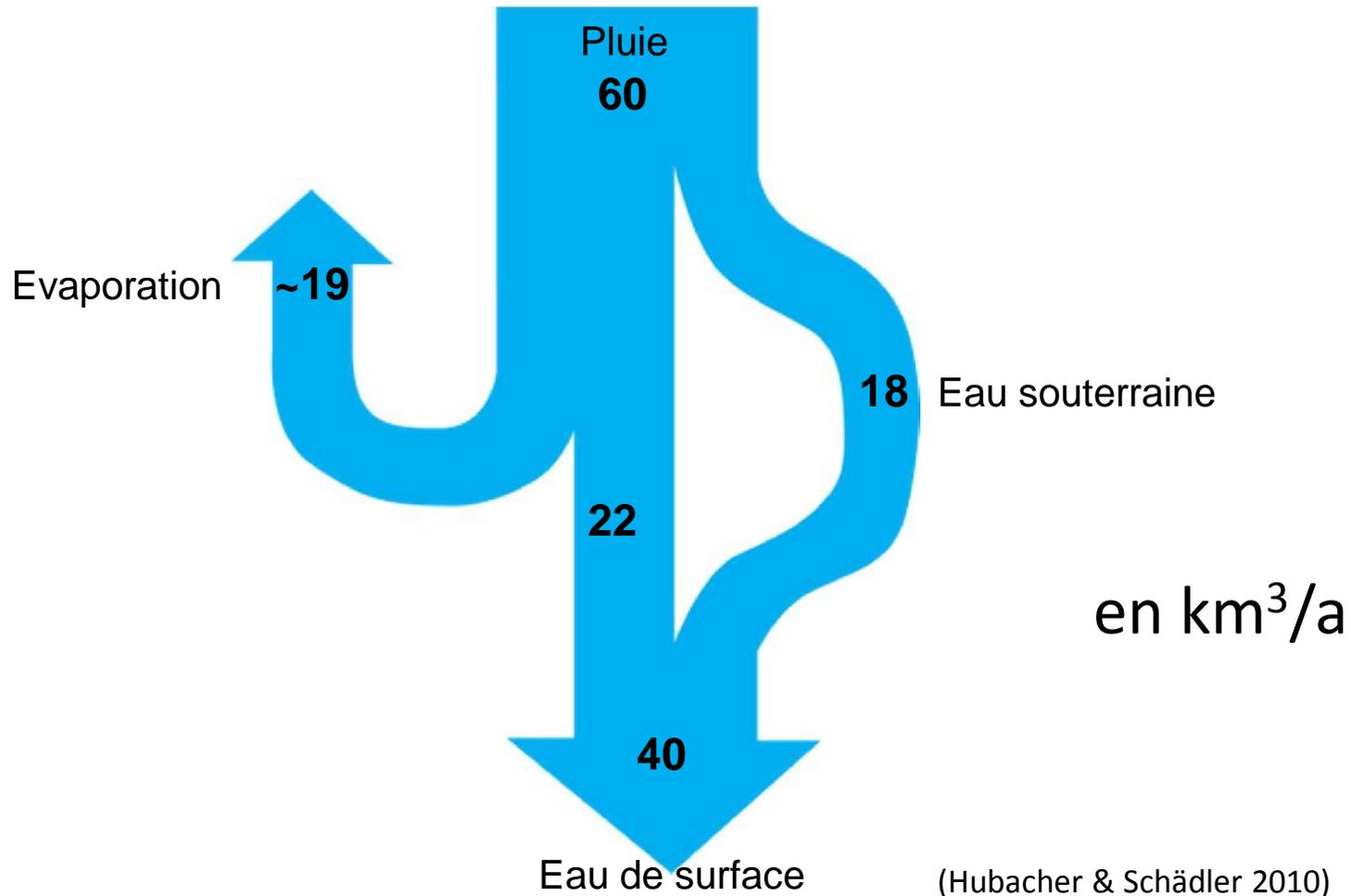
- La science qui explore et décrit la localisation, l'abondance et la dynamique de l'eau dans le sous-sol.

Les deux sont:

Des géosciences (sciences de la Terre) qui combinent différentes disciplines (ingénierie civile, géologie, sciences forestières, pédologie, etc.) et techniques pour qualifier la qualité et la quantité de l'eau dans le système terrestre.

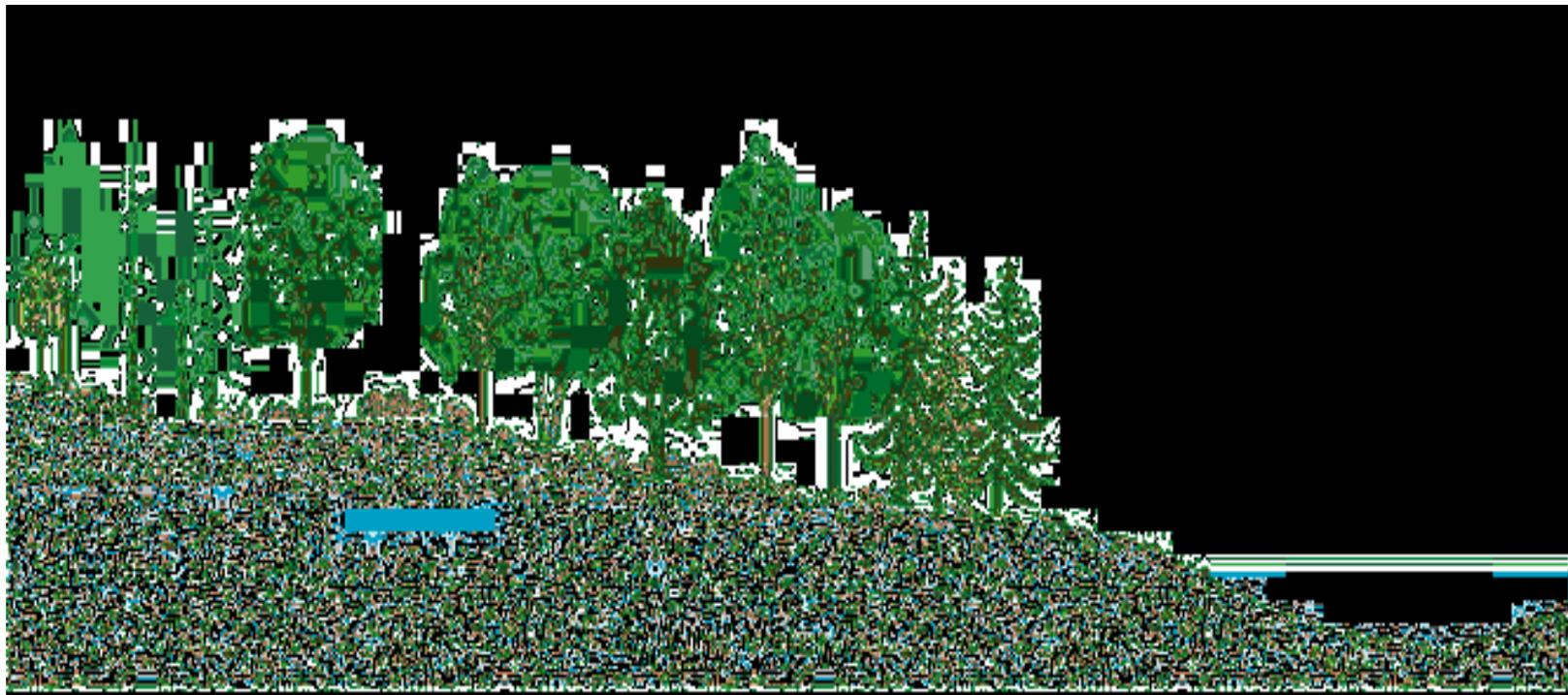
Systemes d'eau souterraine à différentes échelles:

- redistribuent l'eau dans l'espace et dans le temps



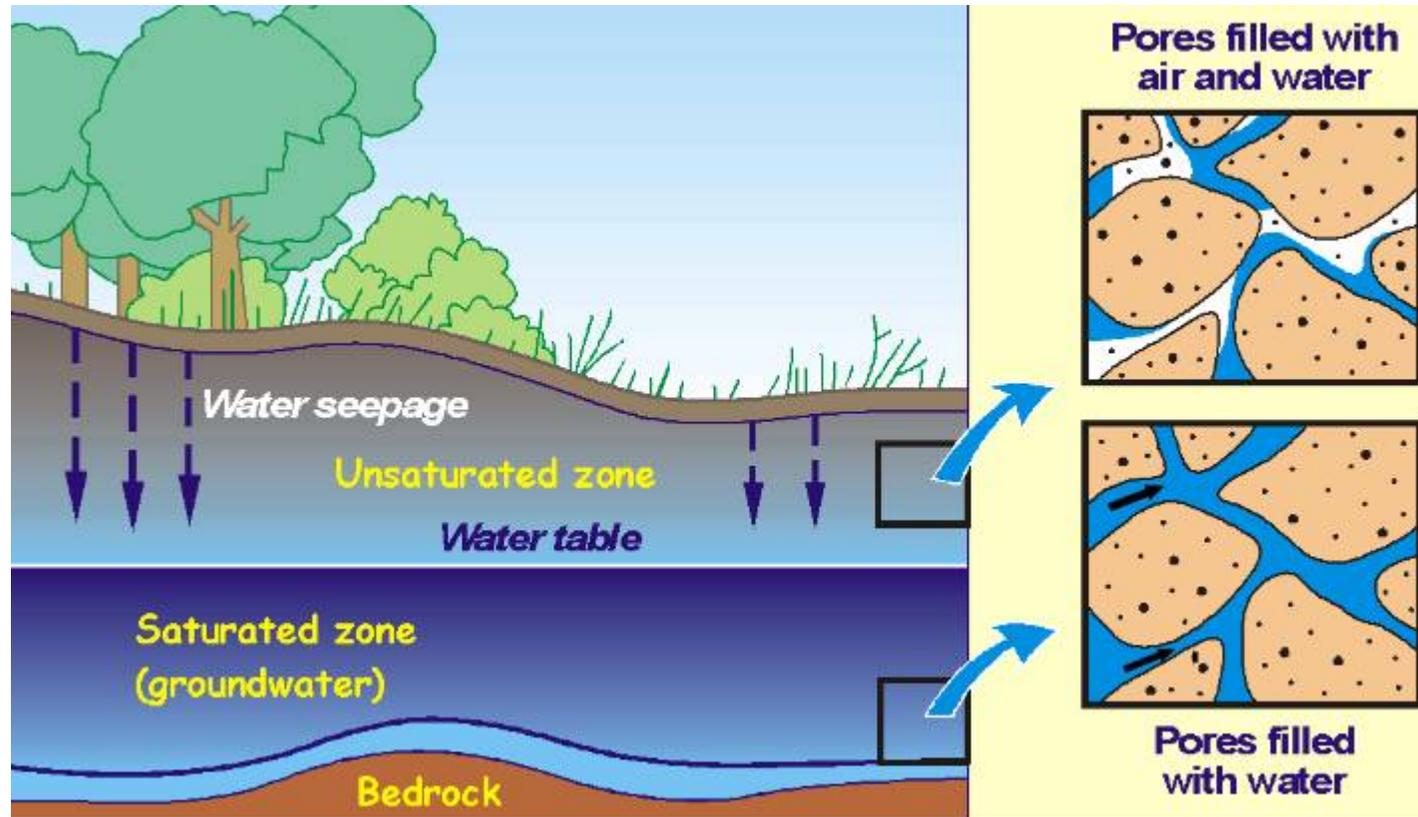
EAU SOUTERRAINE: QUELQUES DÉFINITIONS

L'eau souterraine: toute eau présente dans le sous-sol
(à l'exception de l'eau de constitution dans les minéraux)



NCGRT.org

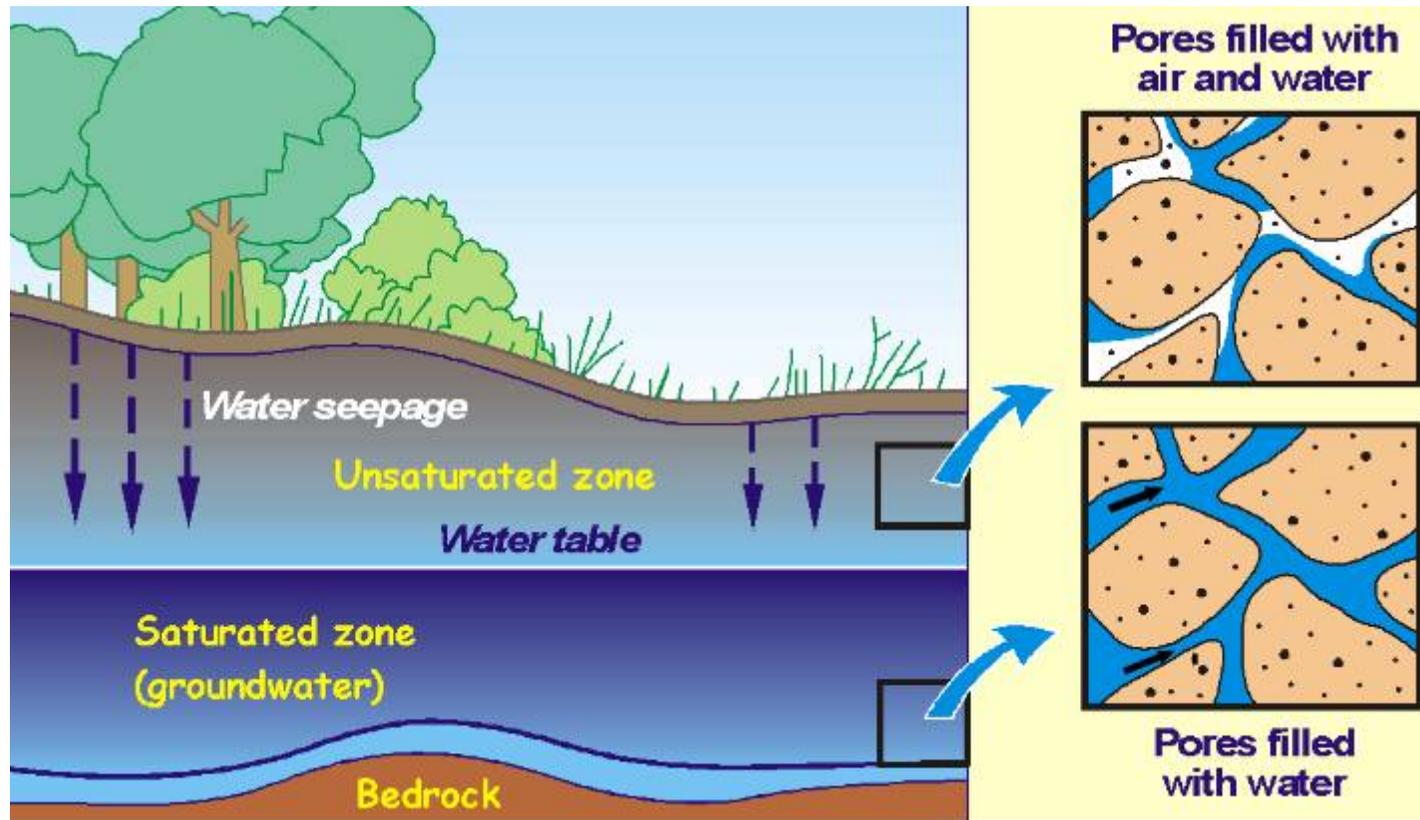
Zone non saturée (vadose)



<http://www.groundwater.com.au/>

- **Zone non saturée (vadose)** : Zone dans laquelle l'eau n'occupe pas complètement les interstices des roches - 3 phases : liquide (eau), gazeuse (air), solide (minéraux)

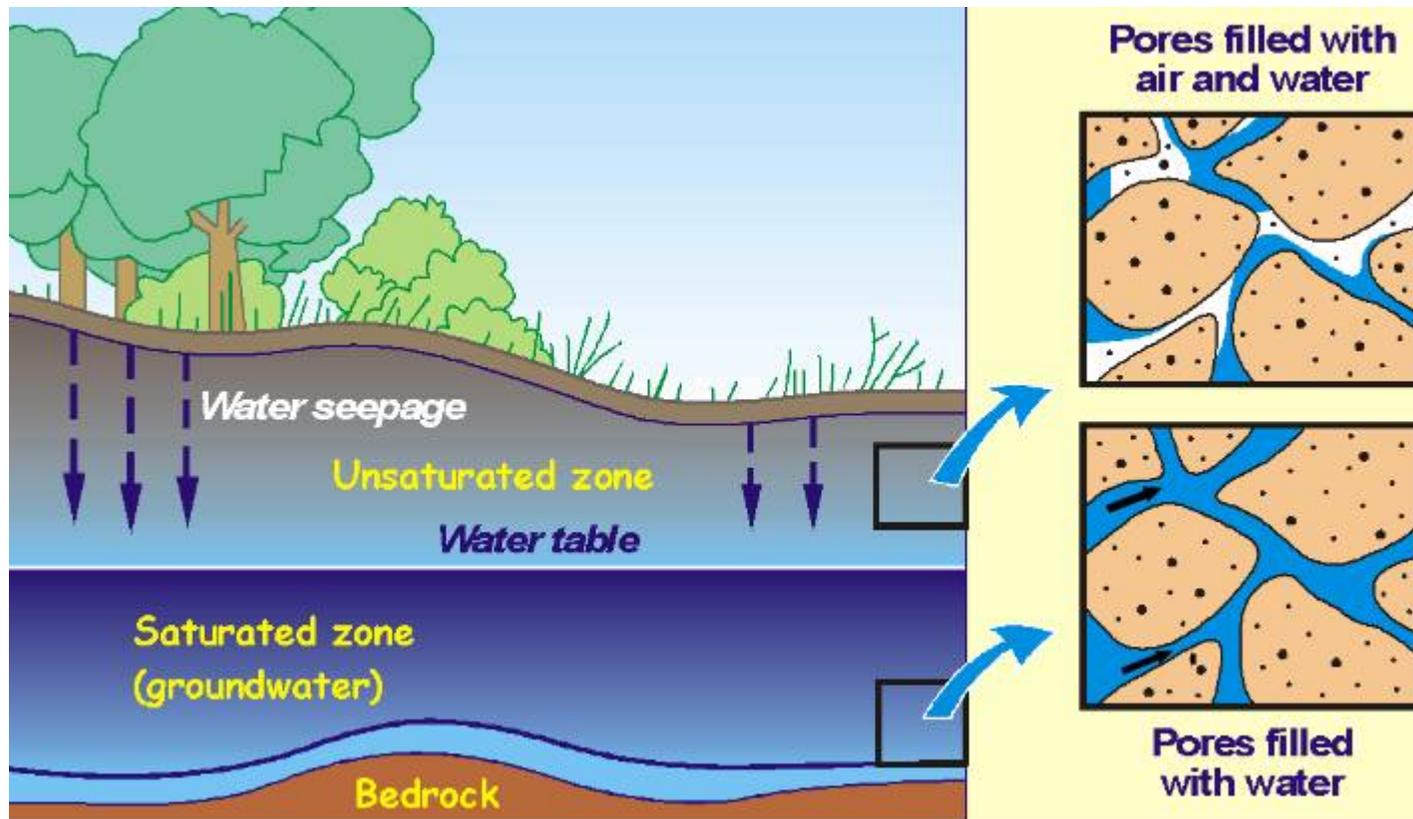
Zone saturée (noyée, phréatique)



<http://www.groundwater.com.au/>

Zone saturée (noyée, phréatique) : Zone dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices- 2 phases : liquide (eau), solide (minéraux)

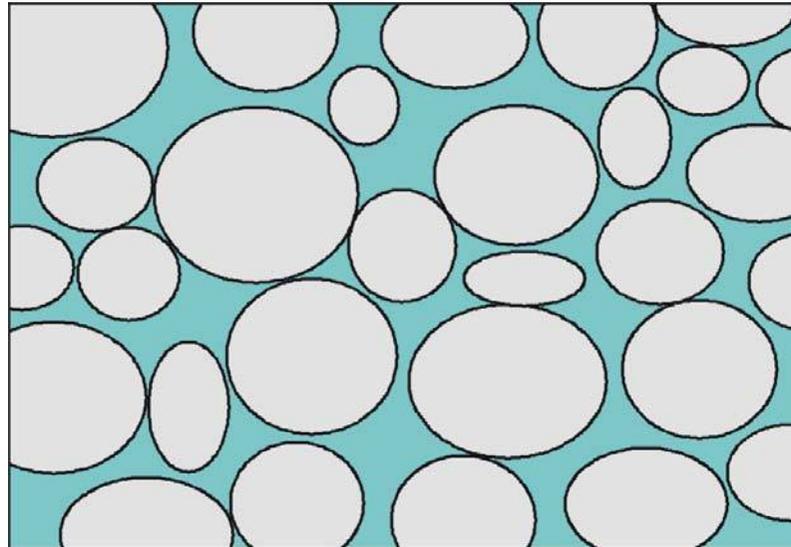
Aquifère



<http://www.groundwater.com.au/>

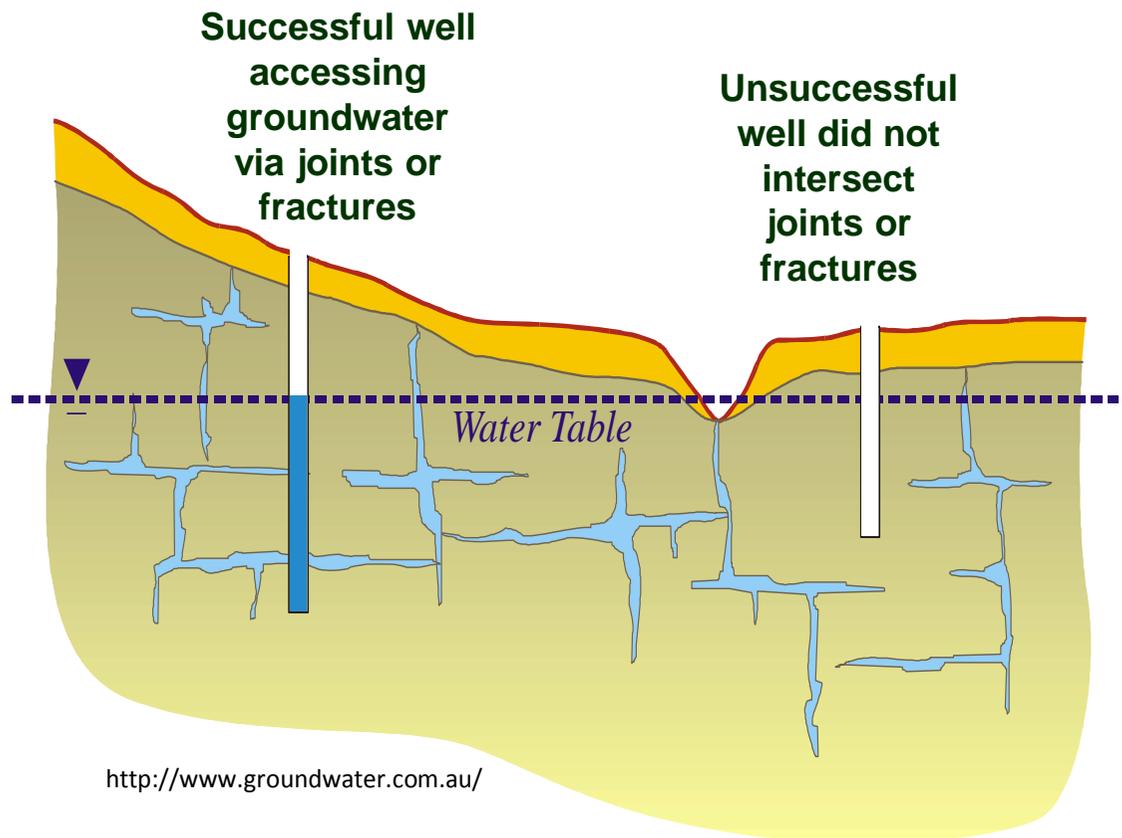
Aquifère: Corps (couche, massif) de roches comportant une zone saturée suffisamment perméable pour permettre un écoulement significatif. Exemple: Gravier et sable.

1.) Aquifères poreux



- se forment dans les sédiments non cimentés, surtout dans les sables et graviers
- l'eau souterraine circule dans les pores entre les grains (effet de filtration)
- vitesse de flux d'environ 1-10 m/jour
- les aquifères poreux sont «les meilleurs» aquifères !

2.) Aquifères fissurés

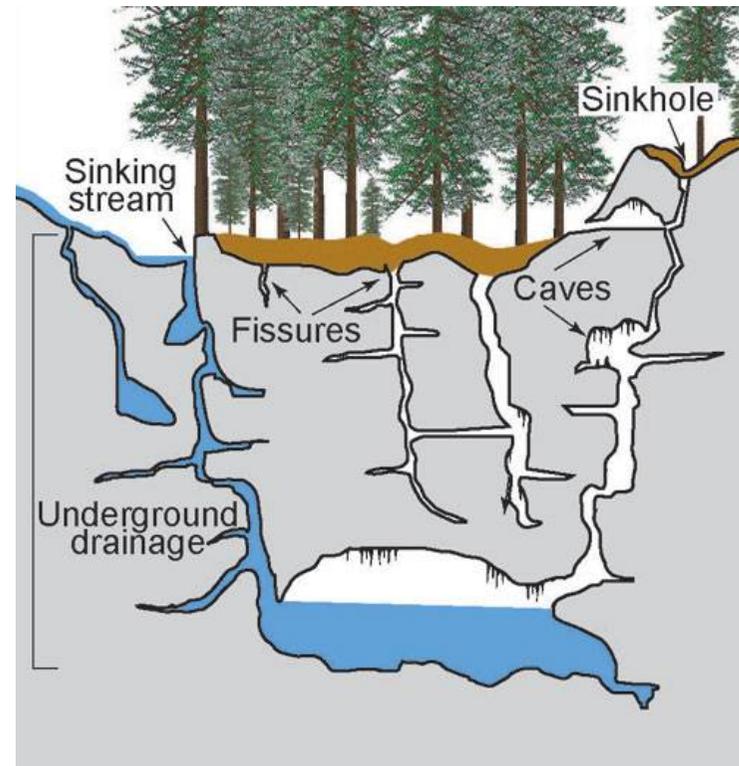


<http://www.groundwater.com.au/>

- se forment dans les roches dures : grès, conglomérat, basalte, granite, gneiss etc.
- l'eau souterraine circule dans les fractures et fissures
- peu de stockage de l'eau dans l'aquifère

3.) Aquifères karstiques

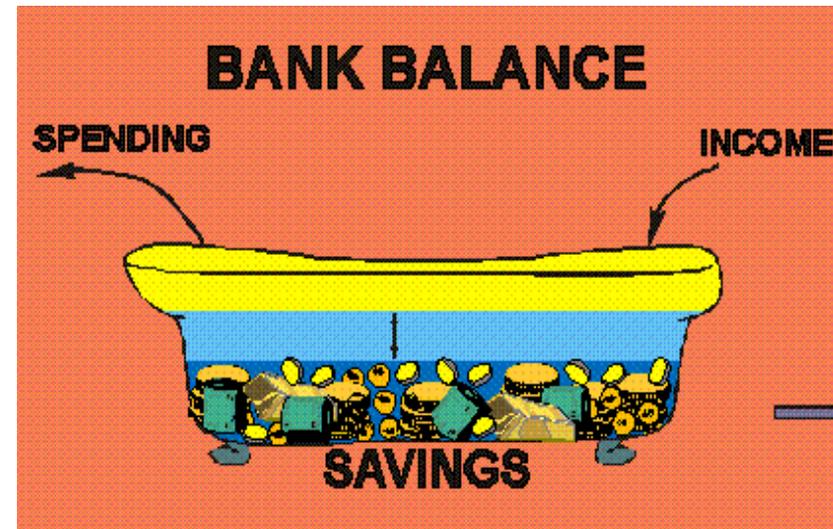
Dans les calcaires, dolomites
et autres roches dures et
solubles



<http://www.groundwater.com.au/>

Comment gérer un aquifère?

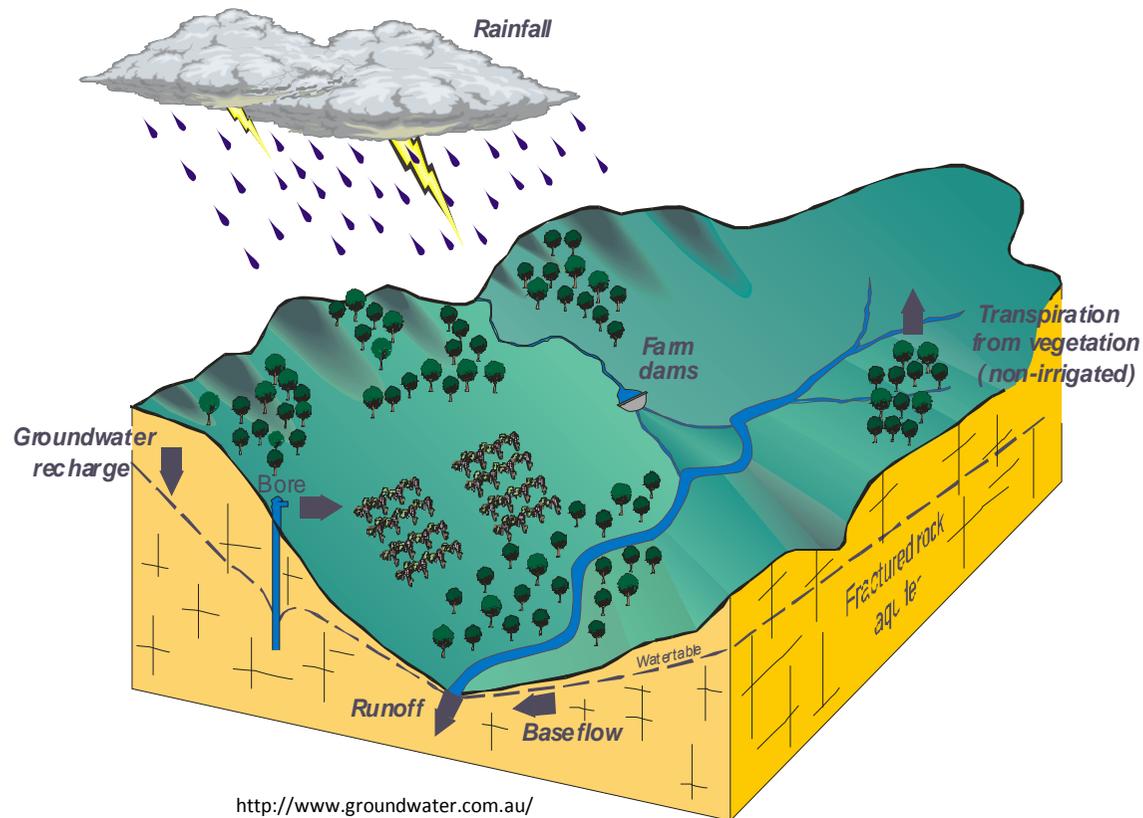
Analogie du compte bancaire



- Si vous utilisez plus d'argent que vous en gagnez, vos épargnes diminuent

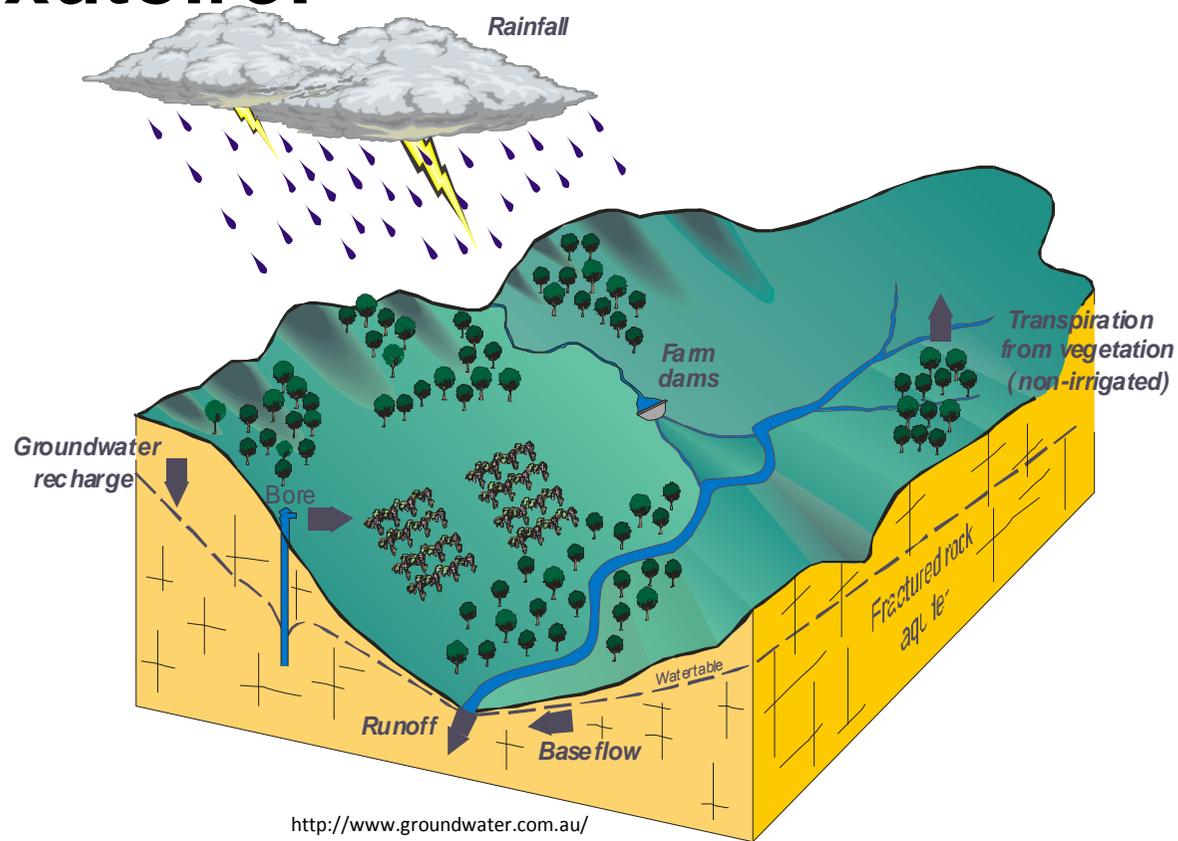
Vous devez vous assurer que: *revenus* > *dépenses*

Recharge:



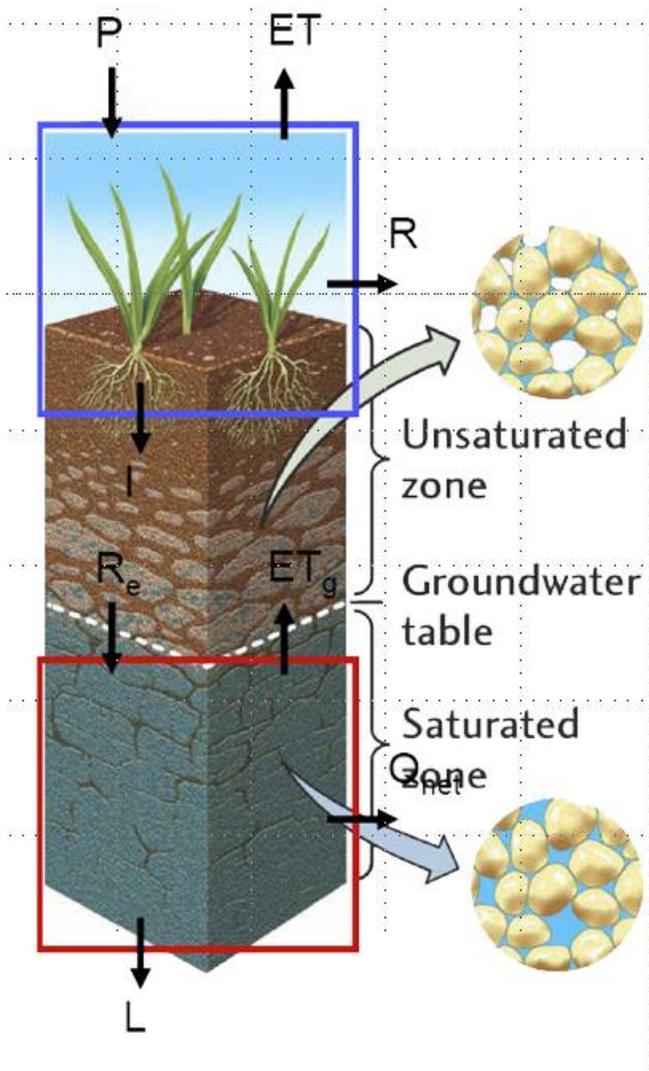
- *Processus par lequel l'eau entre dans le système, plus précisément dans la zone phréatique*

Débit exutoire:



- *Processus par lesquels l'eau quitte un aquifère*

RECHARGE DE L'EAU SOUTERRAINE (1)



<http://www.groundwater.com.au/>

- Infiltration de l'eau de pluie



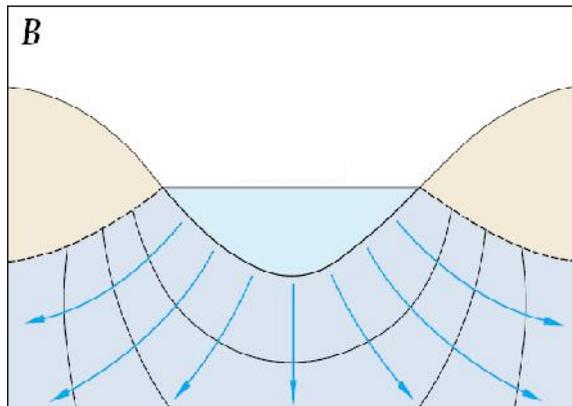
- Irrigation



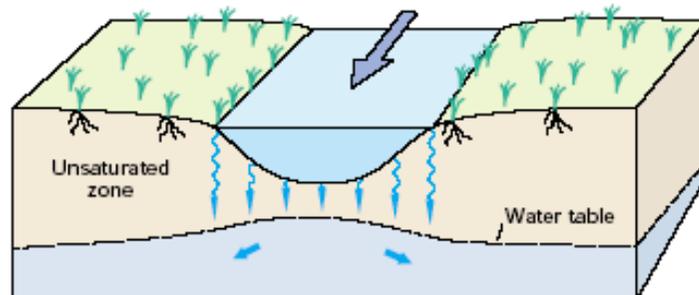
RECHARGE DE L'EAU SOUTERRAINE (2)

Cours d'eau:

Infiltration



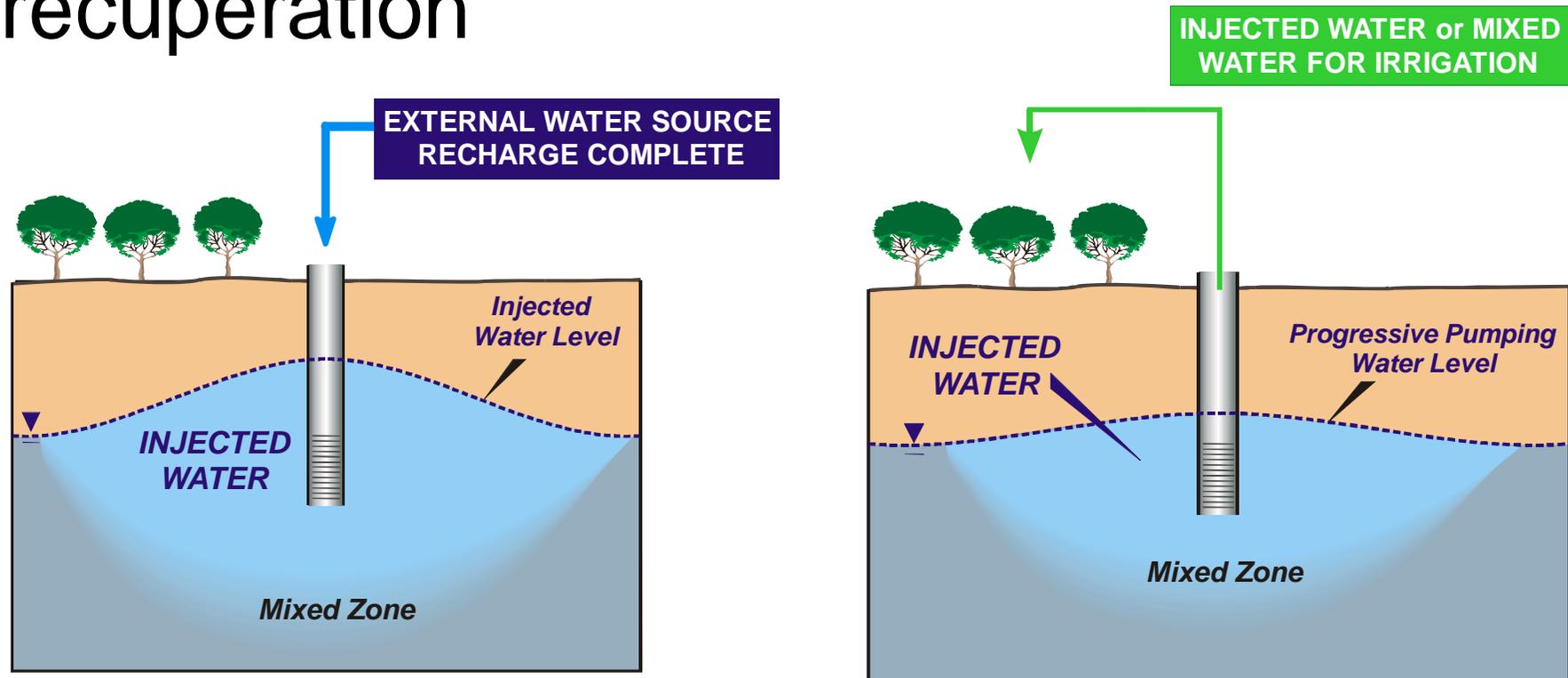
Infiltration, déconnecté



pubs.usgs.gov/circ/circ1139

Recharge par les cours d'eau:
Très importante dans les zones arides et semi-arides

Infiltration, stockage artificiel et récupération



P. Dillon, NCGRT

Sources

- Exutoire concentré de l'eau provenant des couches géologiques; une fontaine naturelle



Source de l'Areuse



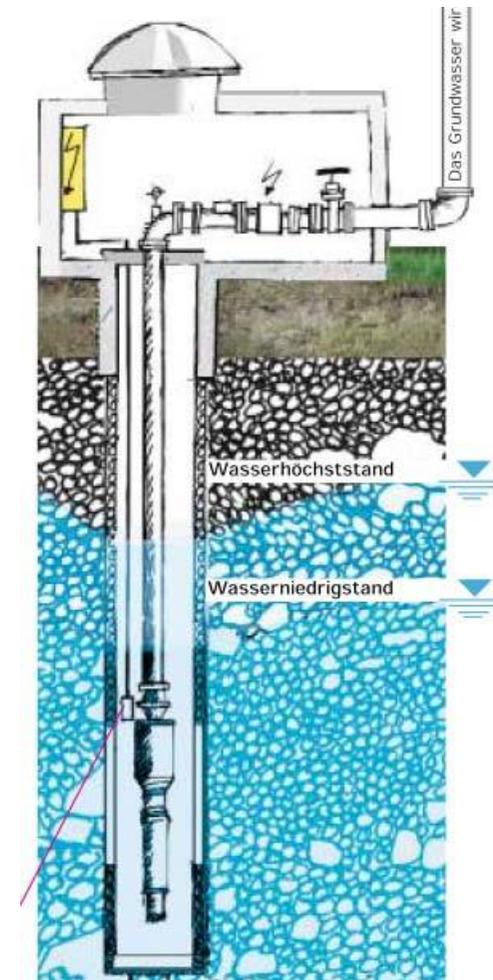
Eau souterraine qui s'exfiltre sur
la plage proche de Fraser
Island (Australie)

Puits de pompage

- Approvisionnement en eau potable

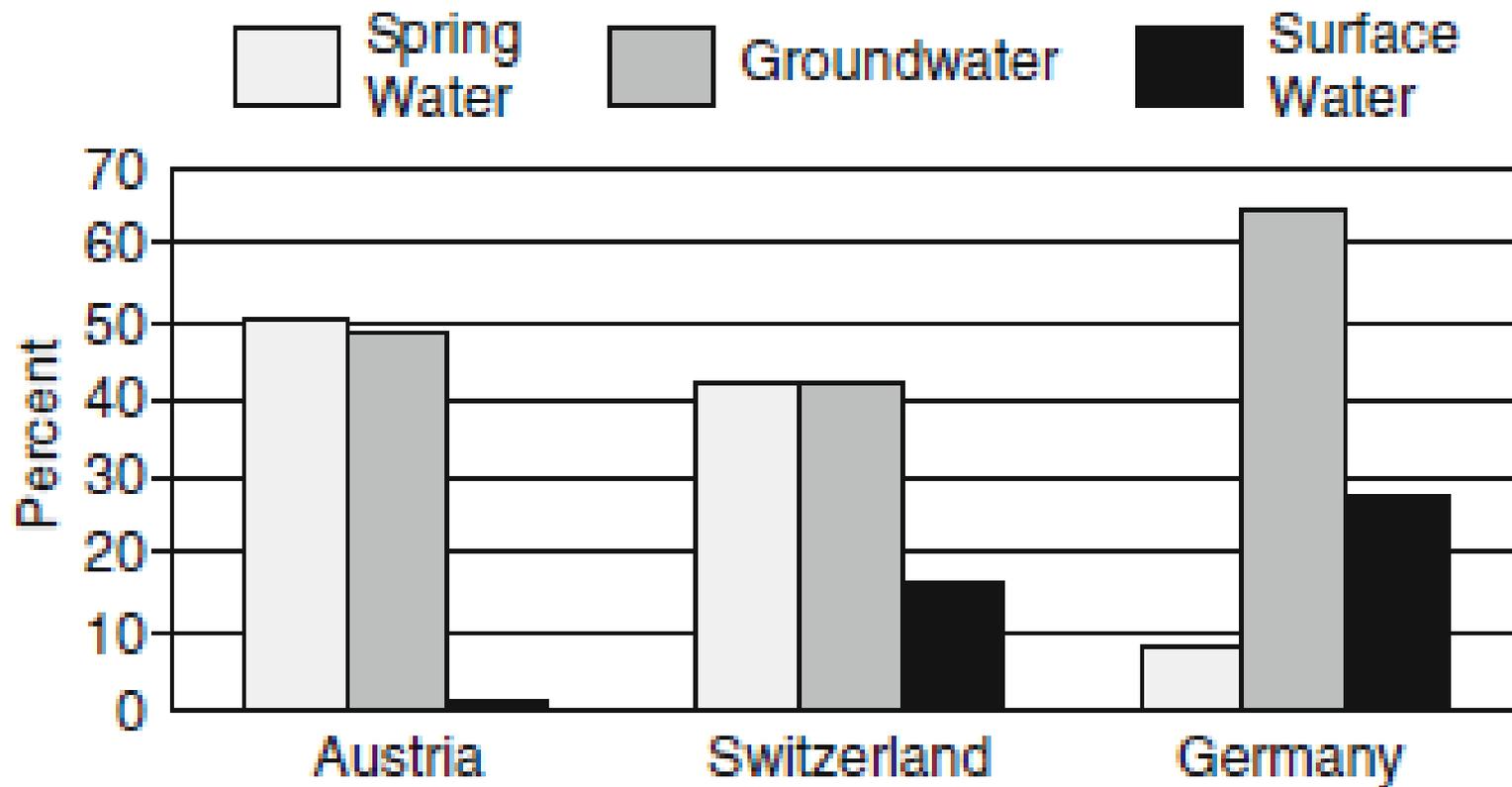


Chambre de pompage typique de la Suisse



FOEN, 2012

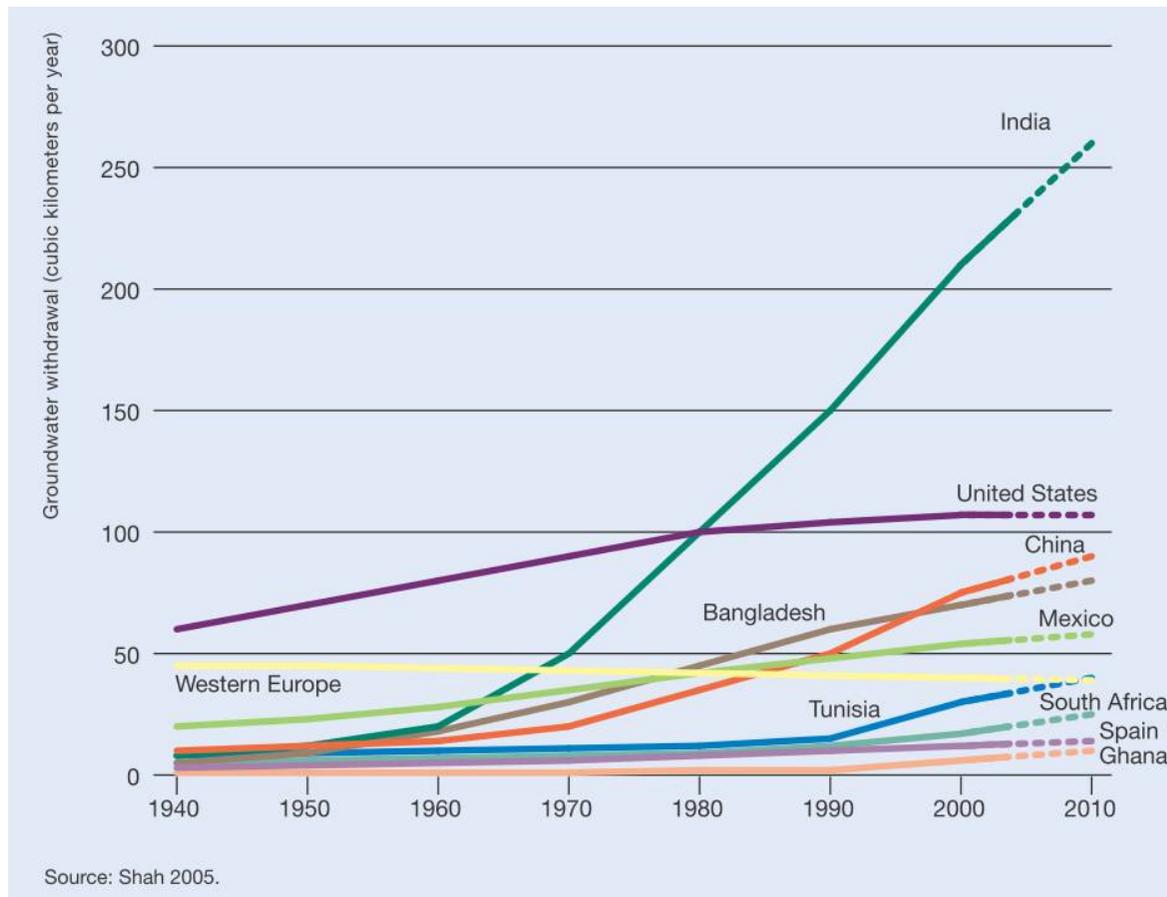
D'où provient notre eau potable?



Source: Groundwater hydrology of springs

DÉBIT DE L'EAU SOUTERRAINE (2)

- Extraction de l'eau souterraine à l'aide de puits de pompage:

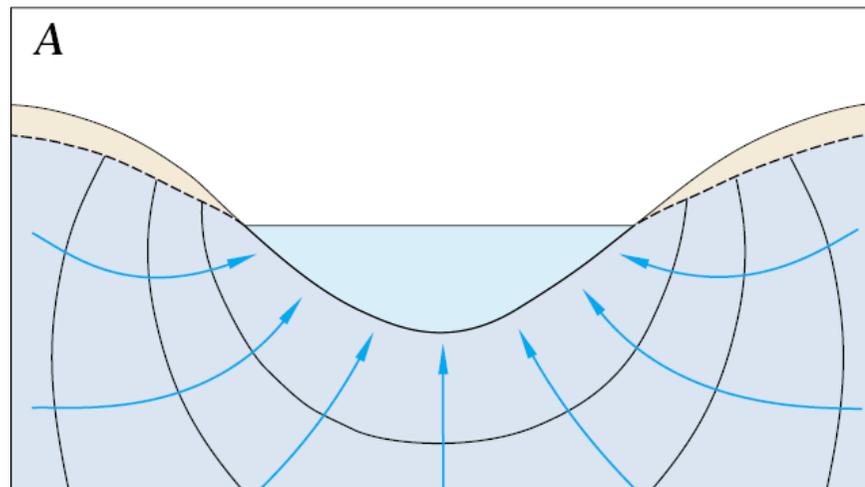


DÉBIT DE L'EAU SOUTERRAINE (3)

Exfiltration vers les eaux de surface:

Important pour:

- Les cours d'eau (niveau de base)
- Les zones humides, les écosystèmes dépendants de l'eau souterraine...



pubs.usgs.gov/circ/circ1139



Végétation

Affecte la quantité de drainage profond de 2 manières:

- La profondeur des racines
- Pérennité des plantes ou non

Phréatophytes (arbres):

- Extraient l'eau depuis la zone saturée et non-saturée
- Agissent comme des pompes
- Maintiennent bas le niveau piezométrique



Hu-Yanglin tree, Tarim basin

DÉBIT DE L'EAU SOUTERRAINE (5)

Evaporation phréatique

Evaporation directe de l'eau souterraine à travers la zone non-saturée

Où?

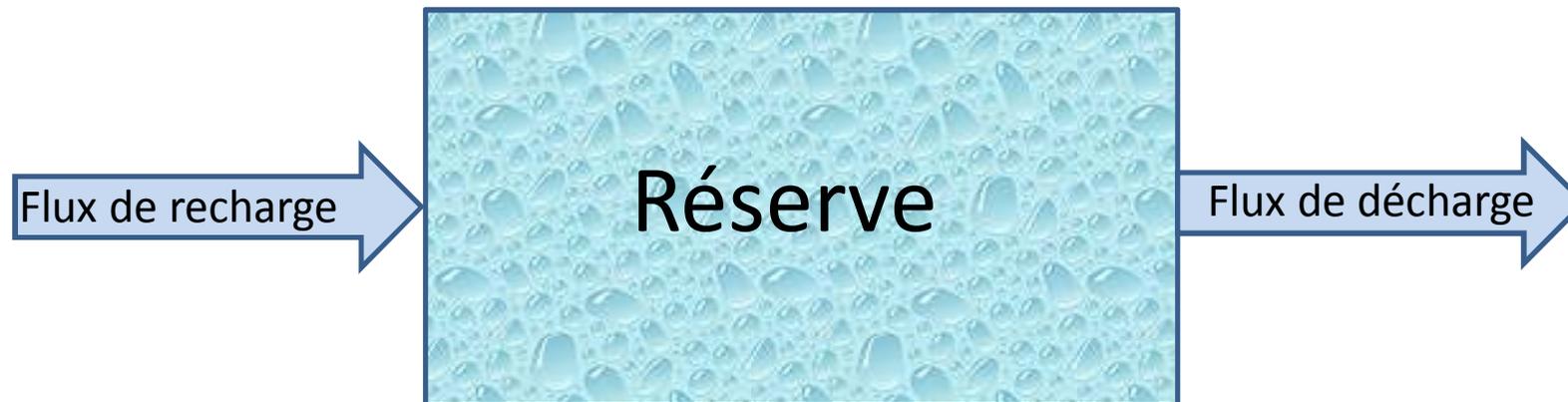
- Points bas des bassins: associée avec salinité



Bilan:

Outil important pour tout type de gestion

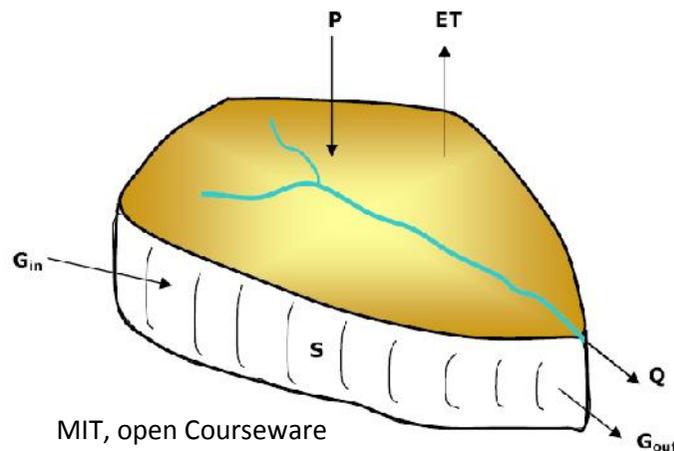
- Le bilan hydrique associe la recharge et la décharge aux changements dans la réserve



- Un bilan peut être décrit comme un changement de masse ou de volume dans le temps Δt
- Mieux: Une variation temporelle de la masse ou du volume dM/dt ou dV/dt

Bassin Versant: unité élémentaire de l'analyse hydrologique

- Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets
- Le bassin versant, en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme **la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section.**
- Il est entièrement caractérisé par son exutoire, à partir duquel nous pouvons tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite.



Une source très utile pour les MNT :
SRTM:

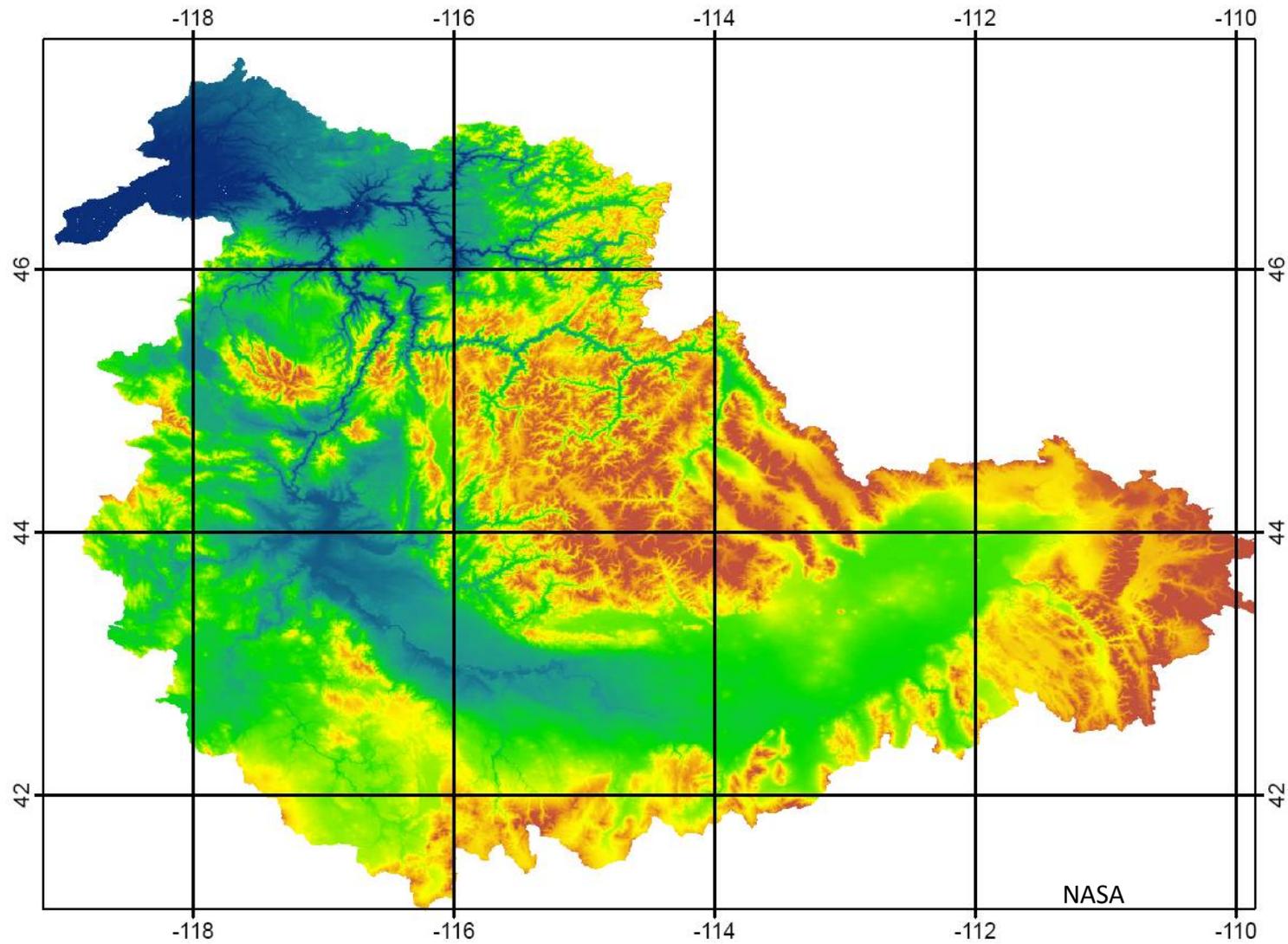
<http://srtm.usgs.gov/>

80% couverture global
90% intervalle de
confiance (élévation): 16 m

ACE-2:
[http://tethys.eaprs.cse.dmu.
ac.uk/ACE2/](http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/ACE2/)

*MNT: Modèle Numérique du Terrain

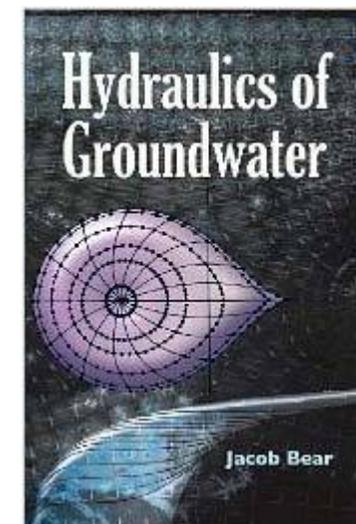
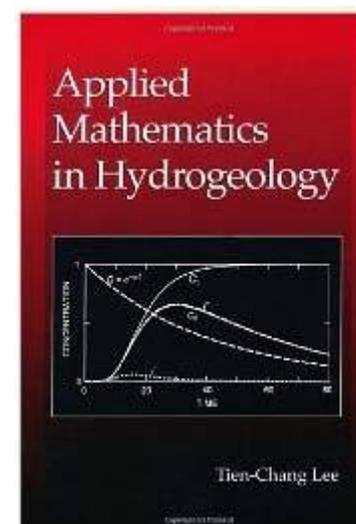
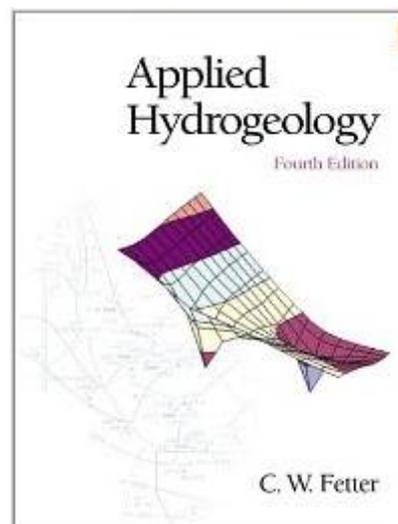
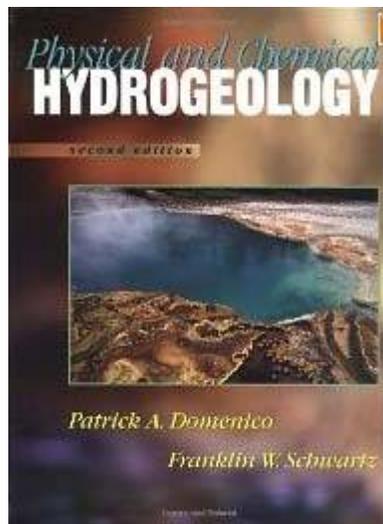




Systemes d'eau souterraine à différentes échelles:

- redistribuent l'eau dans l'espace et dans le temps

L'hydrogéologie «classique» se focalise sur le sous-sol



Systemes d'eau souterraine à différentes échelles:

- redistribuent l'eau dans l'espace et dans le temps
- mécanismes de rétroaction entre:

Les sols



La végétation



Les eaux de surface

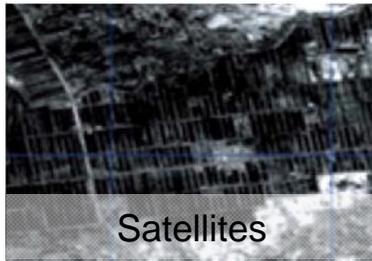


De nouvelles approches ouvrent des portes :

Téledétection



Drones

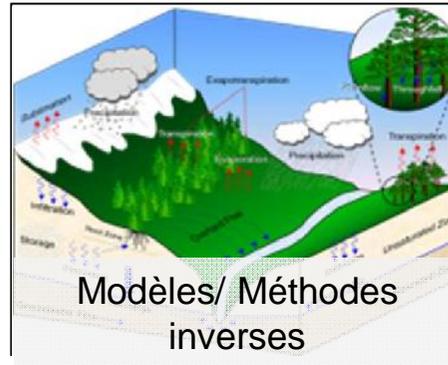


Satellites



Cameras hyperspectrales

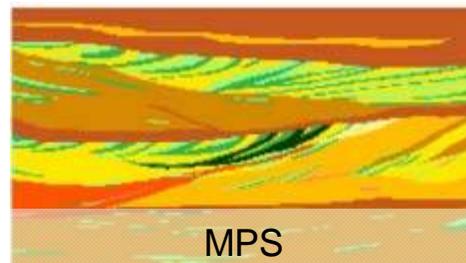
Approches quantitatives



Modèles/ Méthodes inverses

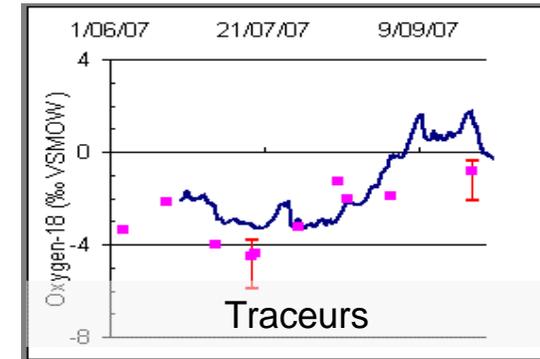


Cloud Computing/ télécommunication

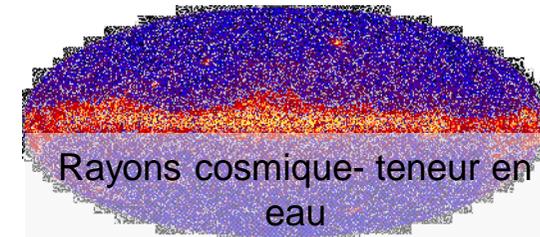


MPS

Méthodes du terrain



Traceurs

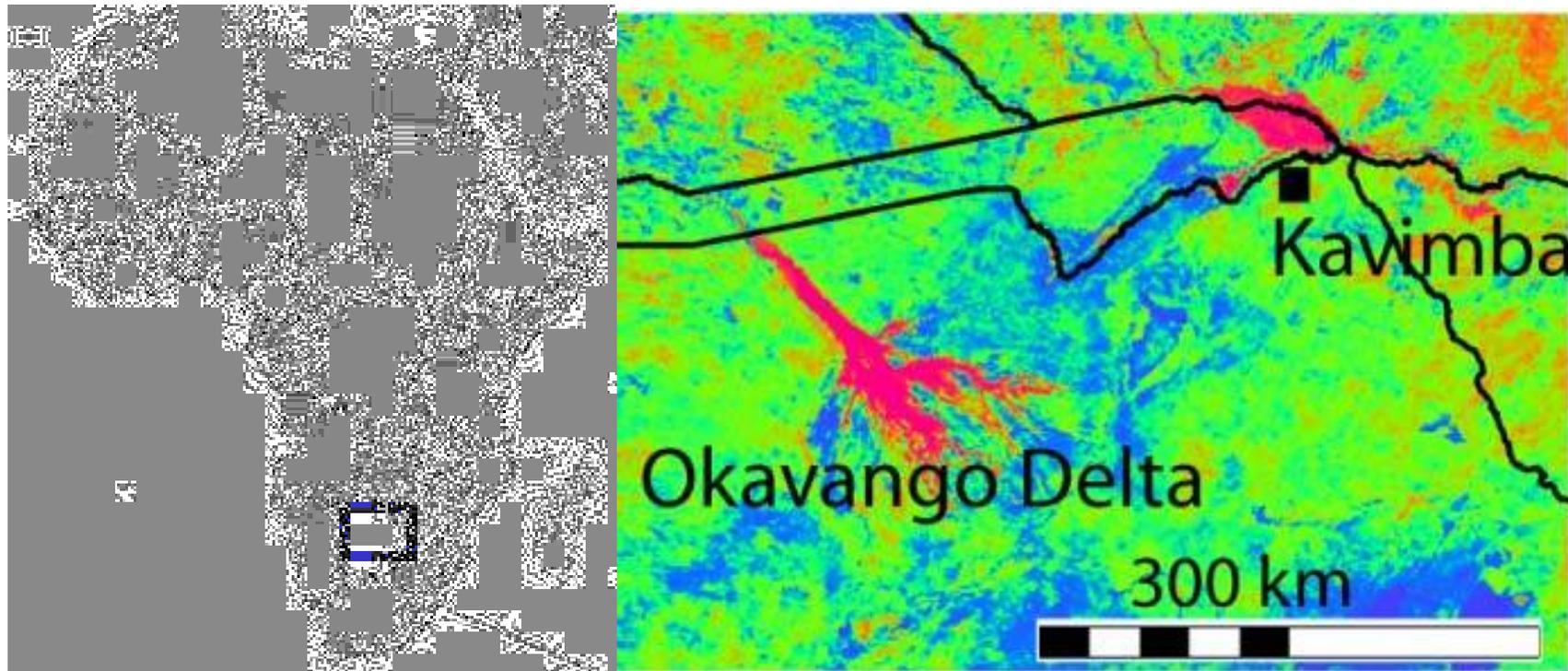


Rayons cosmique- teneur en eau



Eco-hydrologie

Zone du projet: région de Chobe, Botswana



Images de l'étude de cas Botswana : P. Brunner

Zone du projet: région de Chobe, Botswana



Zone du projet: région de Chobe, Botswana

- L'alimentation en eau provient de captages proches de la rivière Chobe
- - Problèmes liés autant à la quantité qu'à la qualité de l'eau
- Définir une nouvelle zone de captage serait-il durable pour l'alimentation en eau urbaine?



Recharge des eaux souterraines: un paramètre clé pour la durabilité

Options alternatives d'alimentation en eau:

- Pipeline de 80 km connecté au réseau existant
- Pomper de l'eau dans l'aquifère à proximité des villages

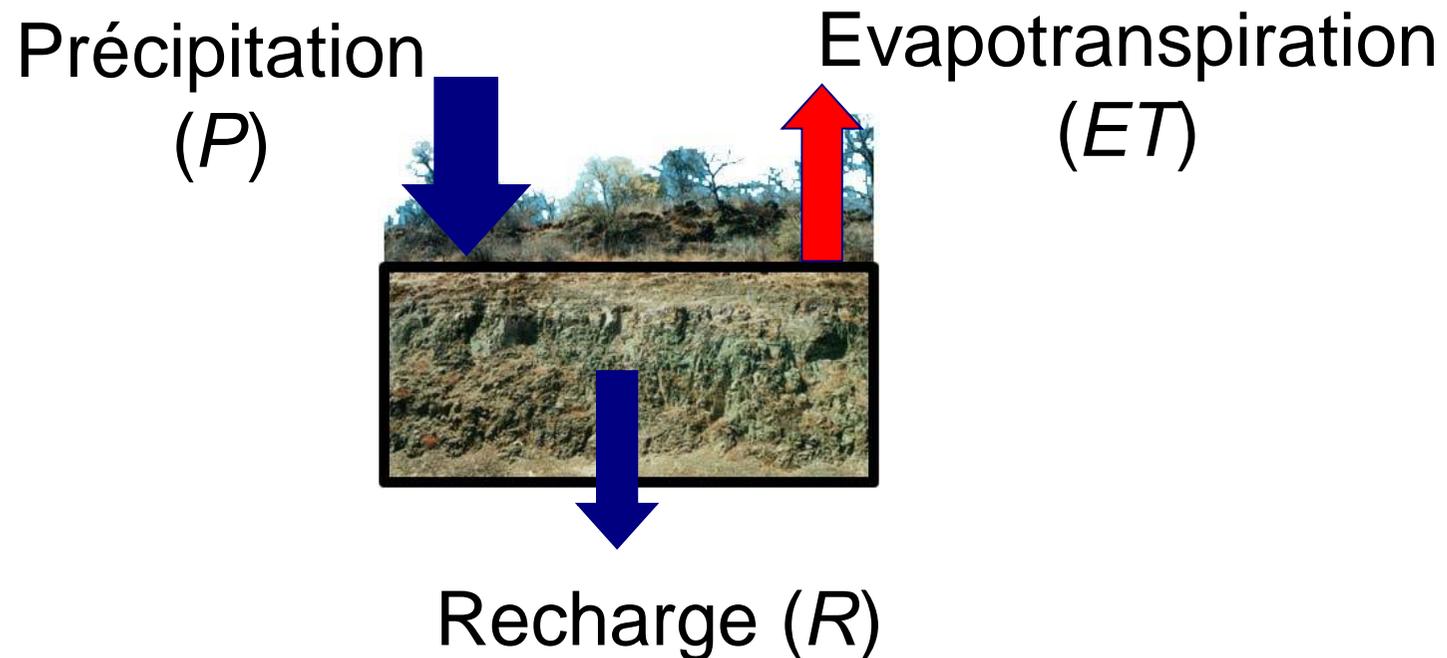


Investigation hydrogéologique dans la région de Chobe:



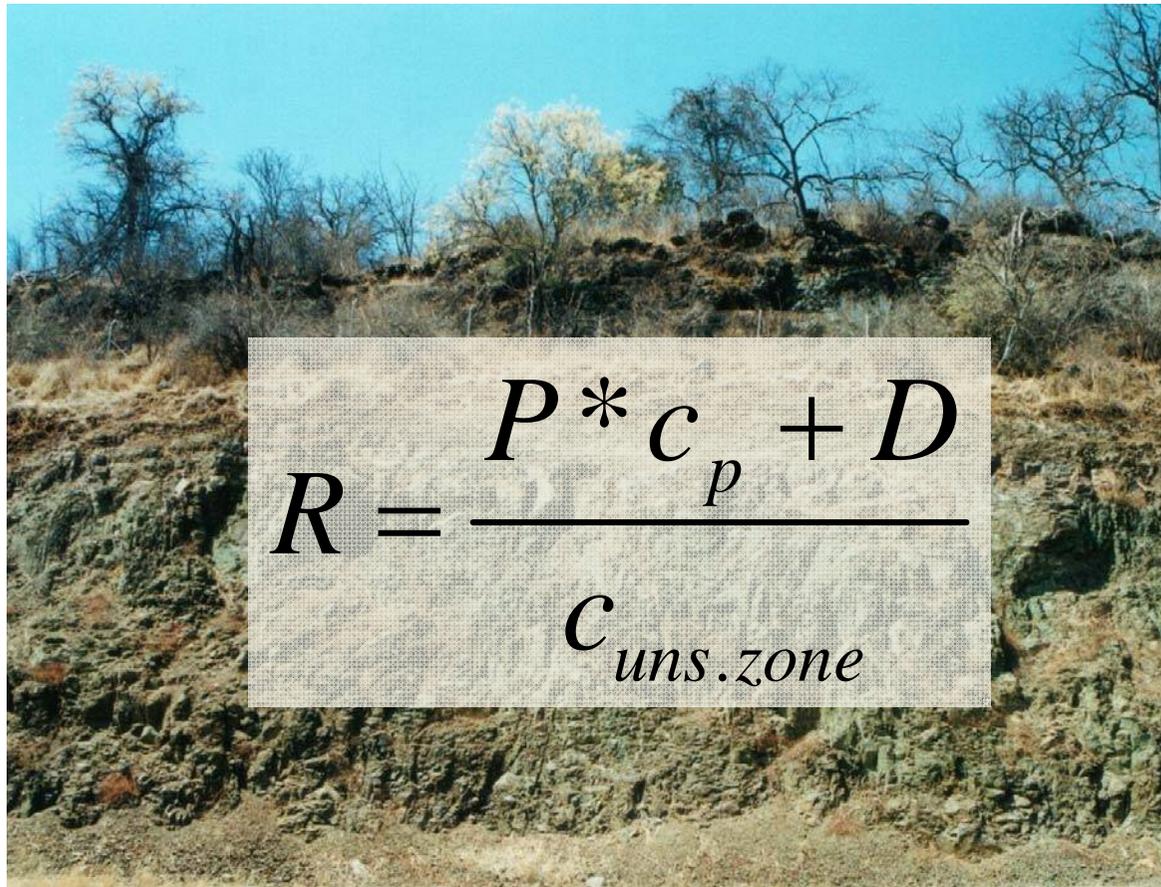
Comment quantifier la recharge des eaux souterraines?

- Simple bilan hydrique: $R = P - ET$



Comment quantifier la recharge des eaux souterraines?

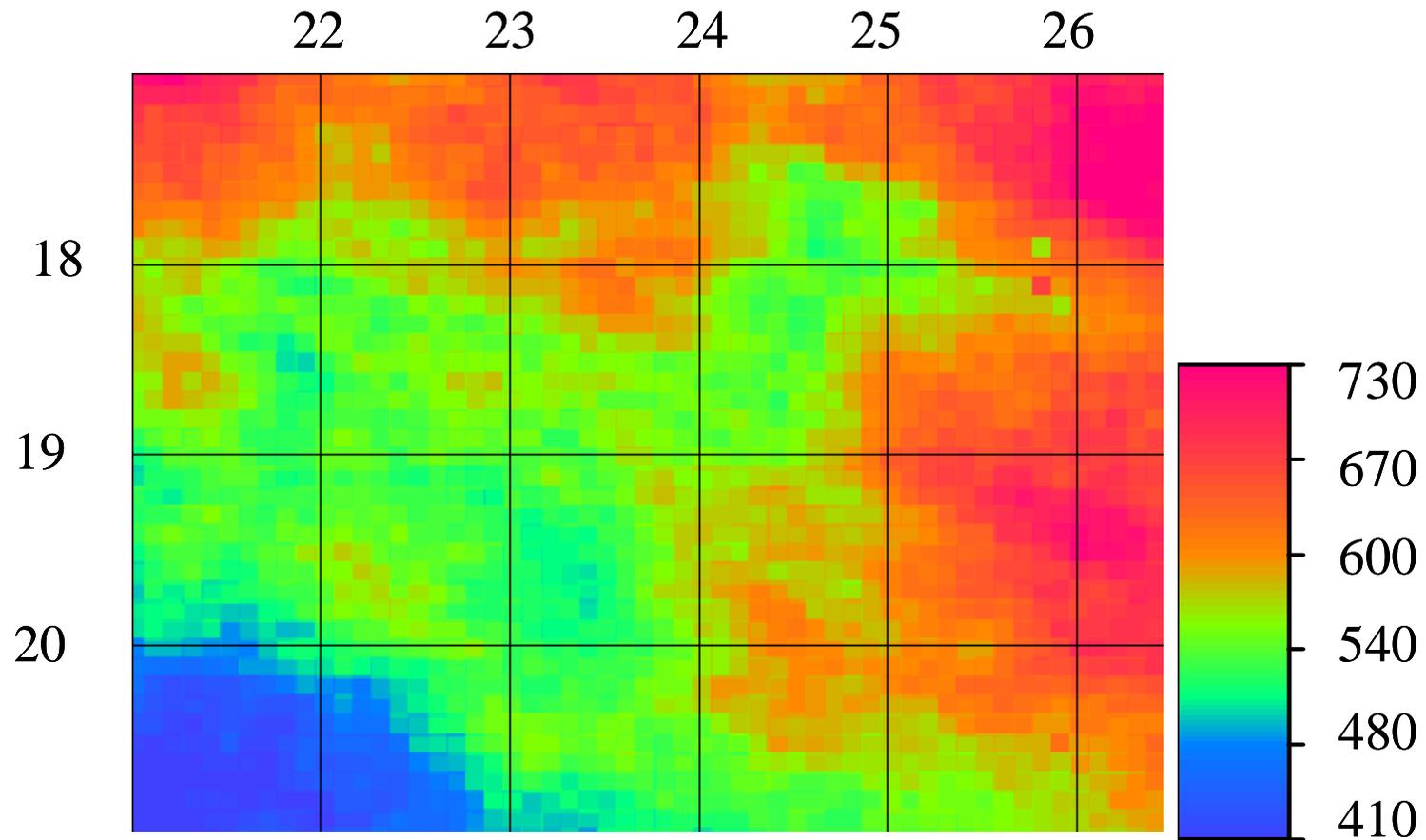
- Bilan massique du chlorure:



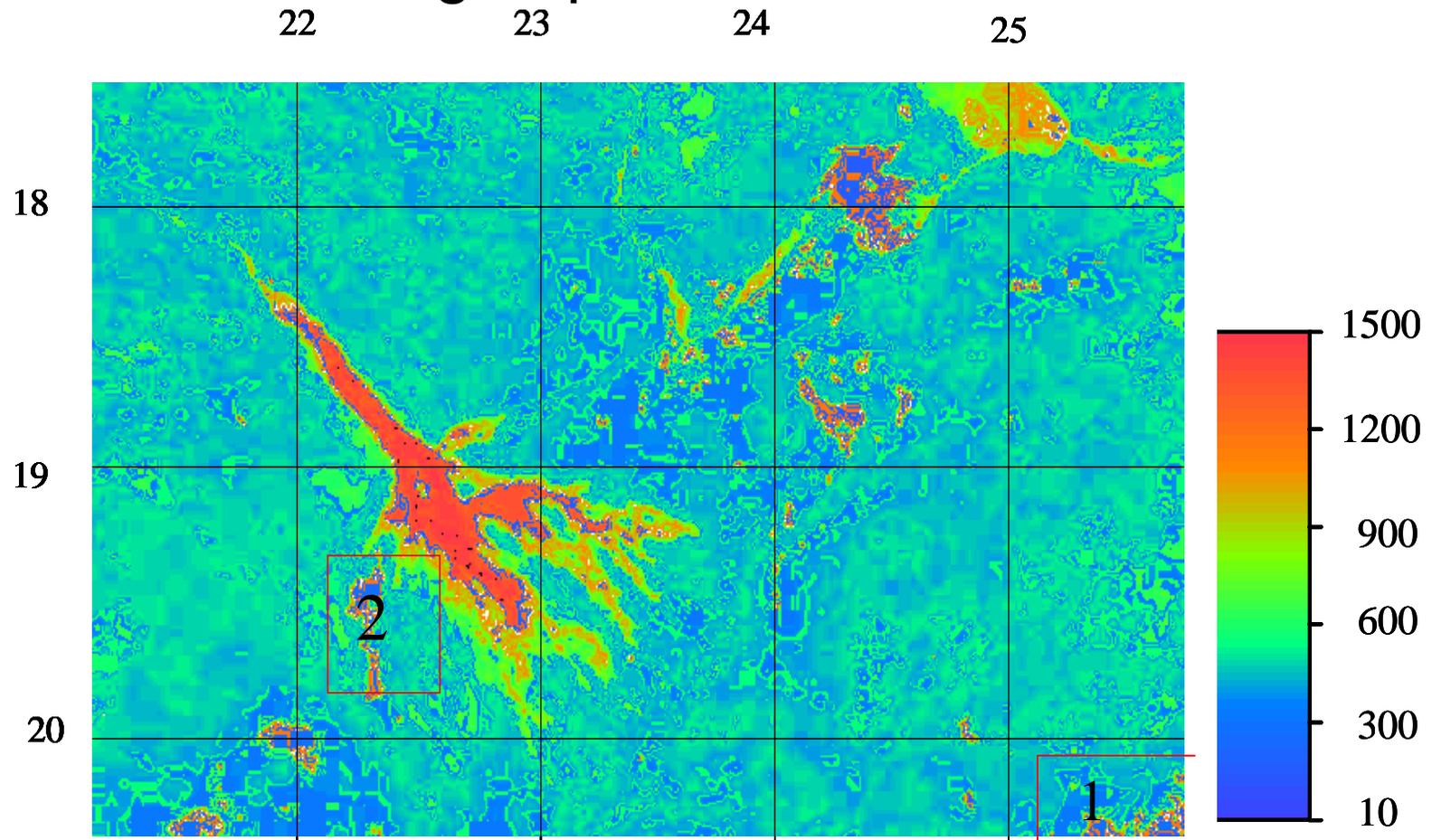
Les pour & contre des bilans hydriques:

- Données d'entrée trop imprécises pour calculer une recharge résiduelle
- + Données d'entrée peuvent être estimées grâce aux données de télédétection avec une certaine résolution spatiale

Estimation des précipitations avec des images radar



Estimation de l'évapotranspiration en calculant le bilan énergétique de surface



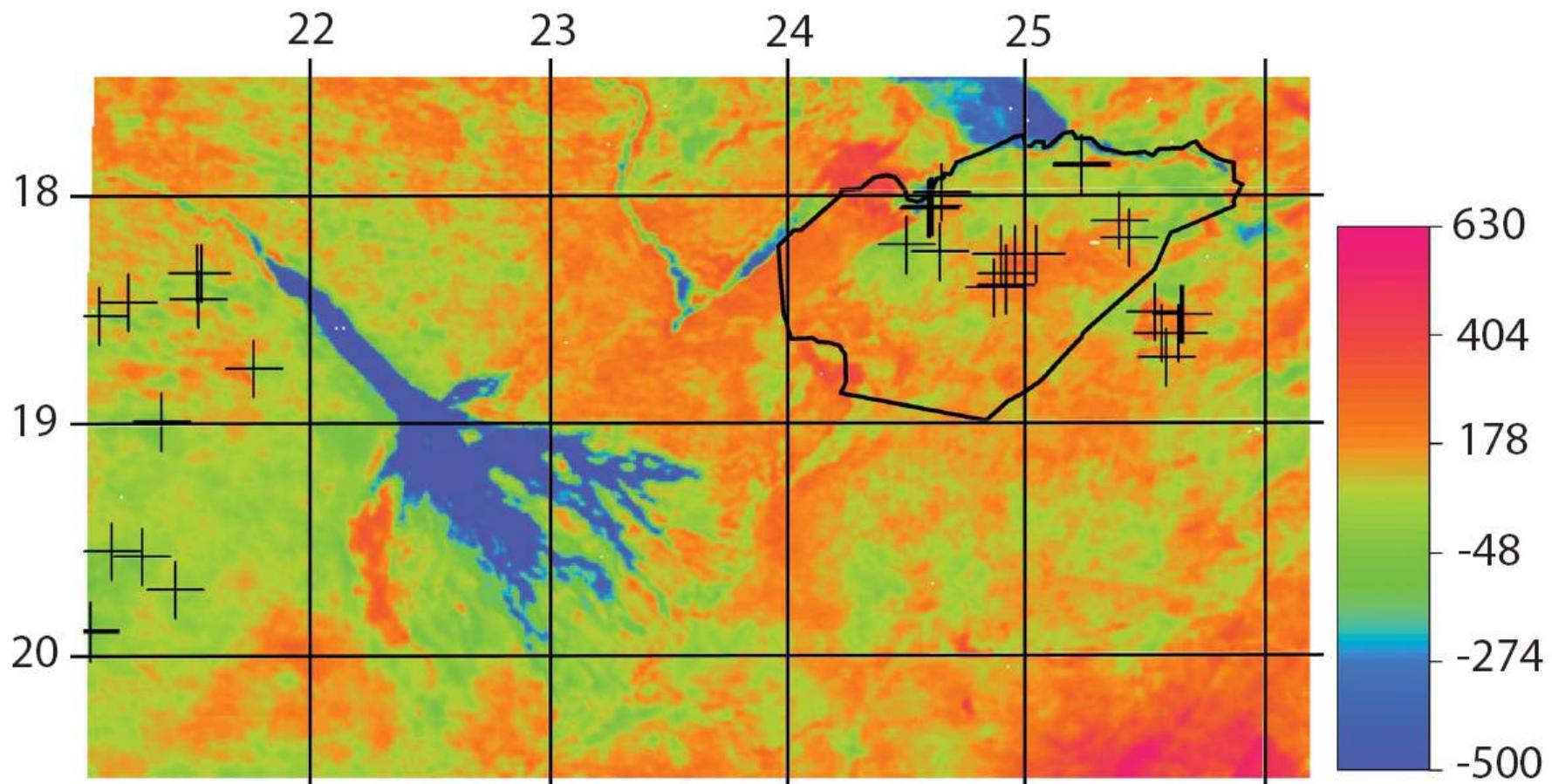
Les pour & contre du bilan massique du chlorure:

- Les taux de recharge sont des données ponctuelles (seulement aux points de mesure du chlorure)

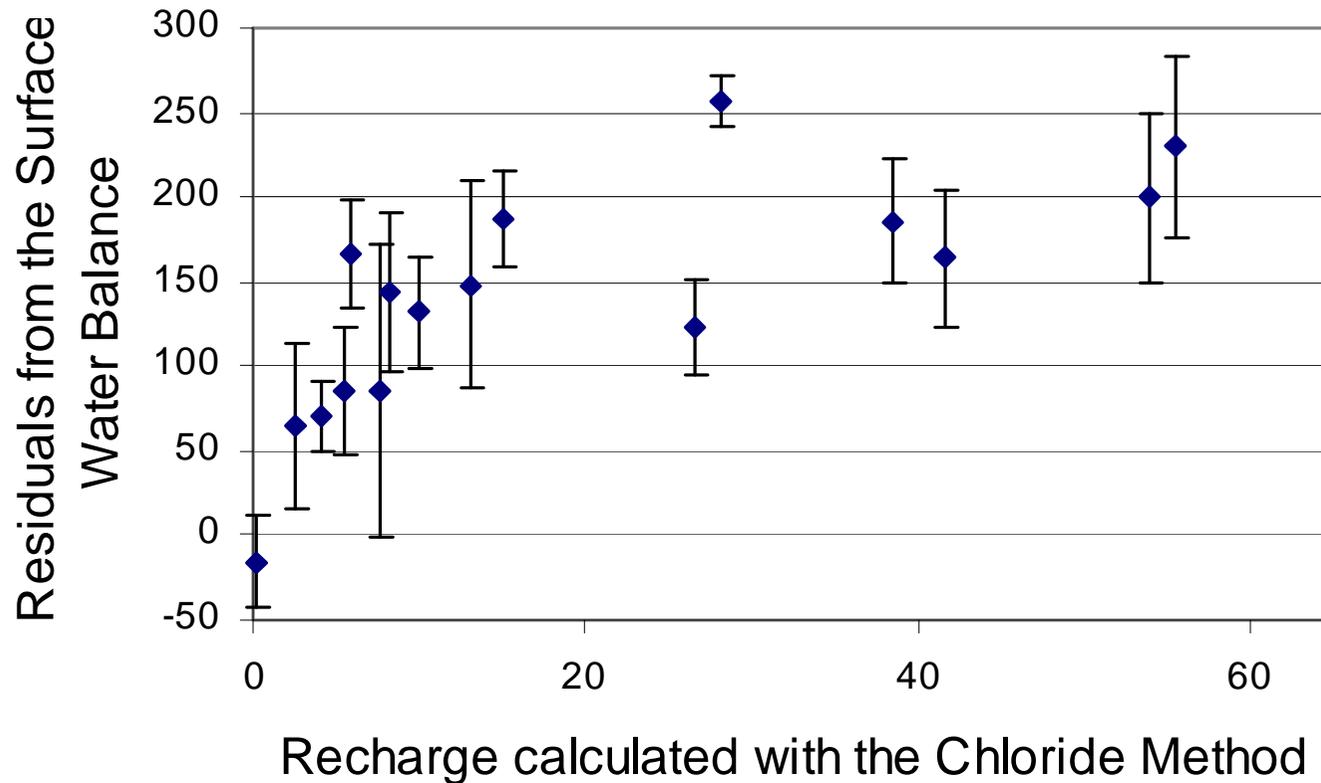
+ Grande précision

$$R = \frac{P * c_p + D}{c_{uns.zone}}$$

Combinaison des deux méthodes.....

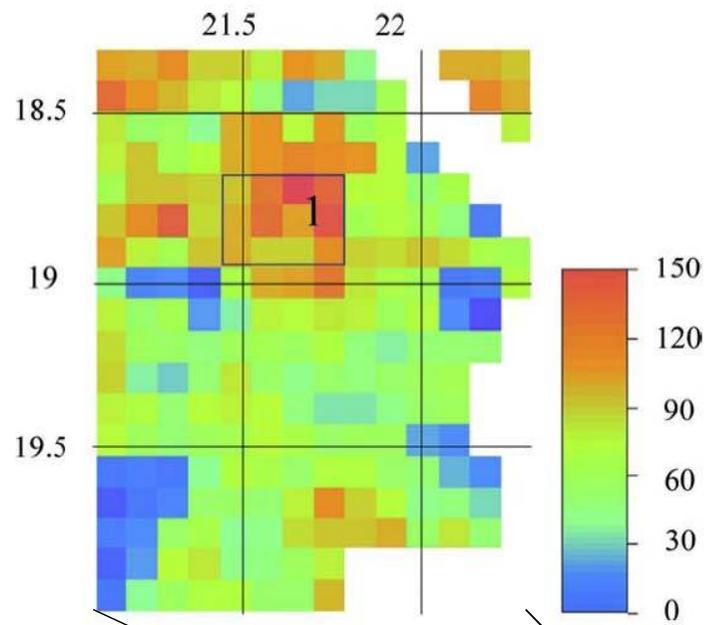


La combinaison des points forts des deux méthodes est possible à condition d'établir une corrélation entre leurs résultats

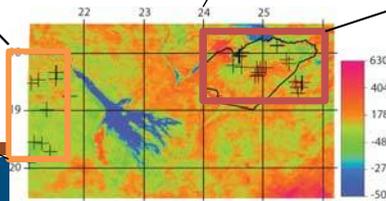
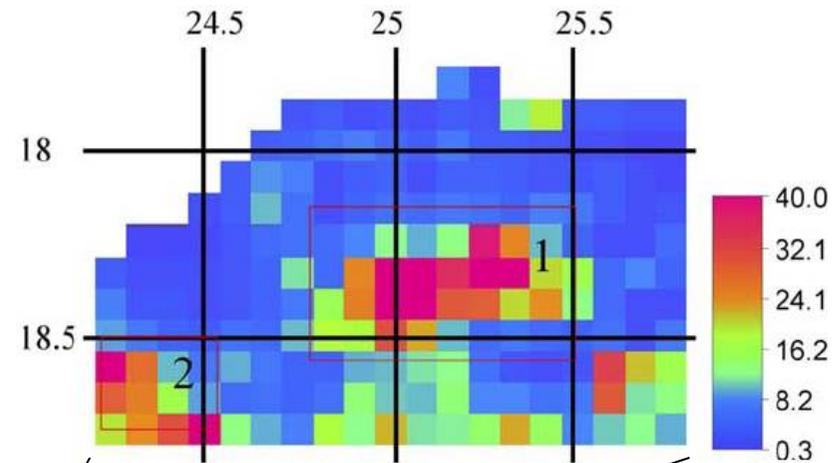


Combinaison des points forts des deux méthodes

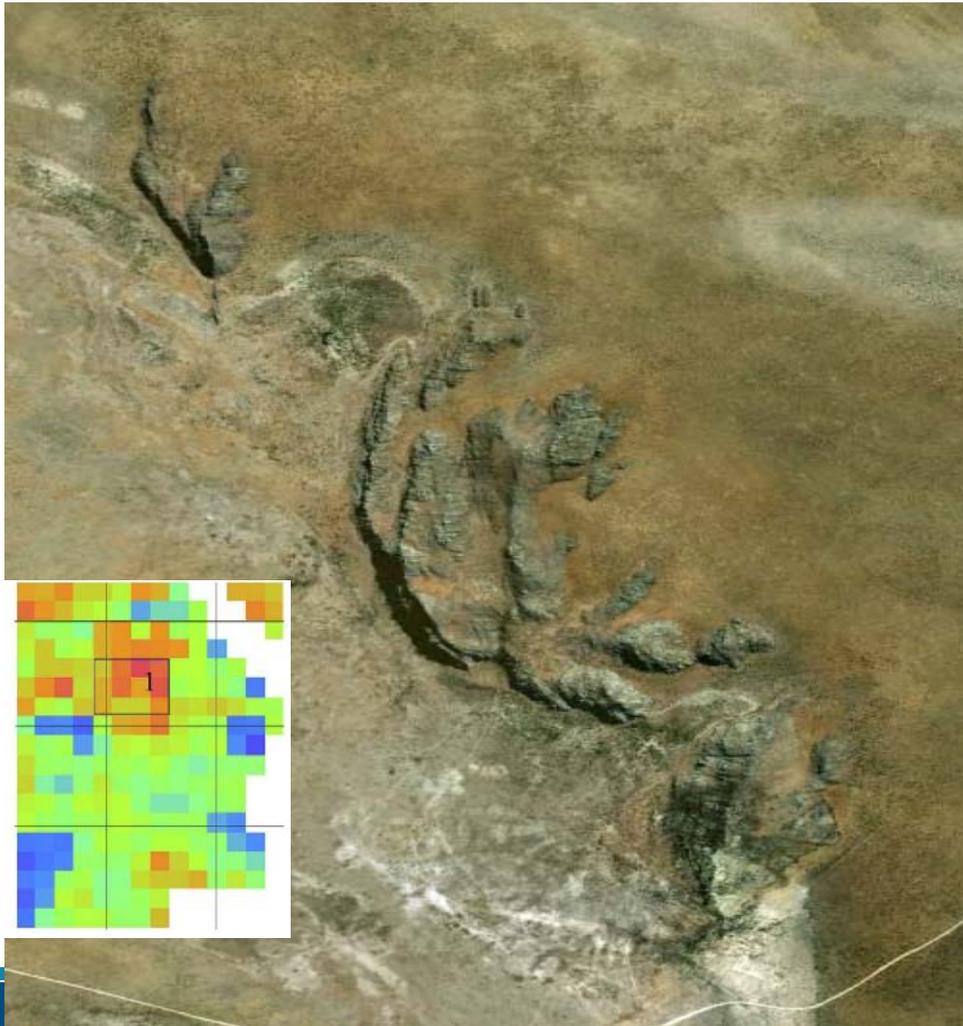
Carte de recharge Ngamiland



Carte de recharge Chobe region



Combinaison des points forts des deux méthodes



Valeurs maximales de recharge
situées aux affleurements rocheux

La recharge est haute comparée aux
débits de pompage

- L'eau souterraine constitue **le plus grand stock** d'eau douce accessible sur terre
- En général l'eau souterraine n'est pas dans des rivières souterraines ou des veines d'eau mais **dans les pores** des roches
- L'eau dans les aquifères **coule en permanence** des zones de recharge vers les exutoires
- A l'équilibre débit de recharge = débit à l'exutoire
- Si on exploite, on change l'équilibre du système

- Suisse : eau potable 70-80 % souterraine
- Pays arides : eau de surface non disponible toute l'année

- Plus difficile à exploiter que l'eau de surface
- Mais meilleure qualité
- Mieux protégée vis à vis des pollutions
- Disponibilité en saison sèche

Merci de votre attention

