



**Grondwater: vaak vergeten
maar zo belangrijk**



**Les eaux souterraines:
peu visibles mais
si importantes**


A. Dassargues

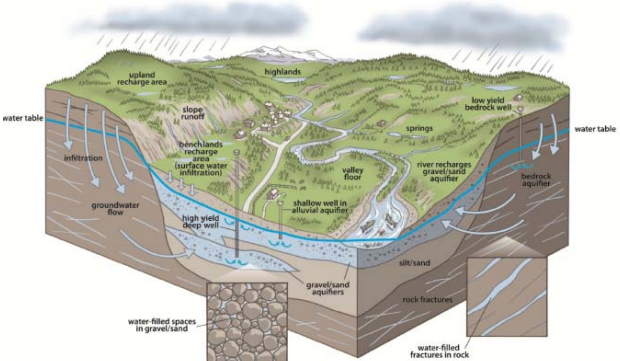
Hydrogeology 
Environmental Geology

Antwerpen, November 09 2023

Grondwaterreserves

 **slecht begrepen**
 **'out of sight, out of mind'**

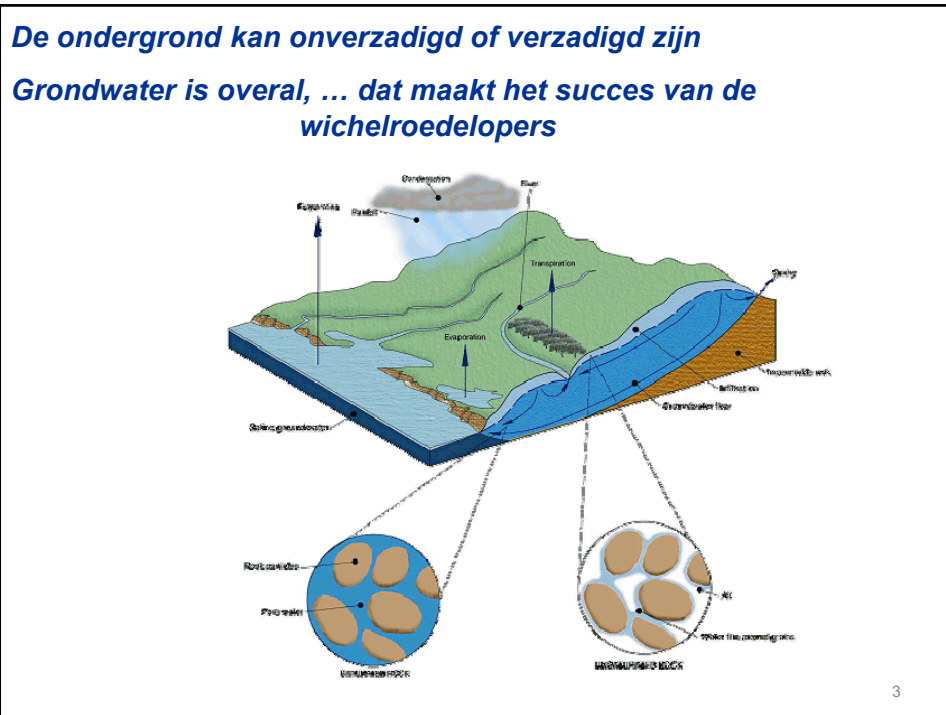




[watershed-wash.org]

Watervoerende laag = aquifer = elke verzadigde geologische formatie met een 'voldoende' permeabiliteit... om water in hoeveelheid te kunnen produceren
= Aquifer (En)
= Aquifère (Fr) = 'nappe aquifère'

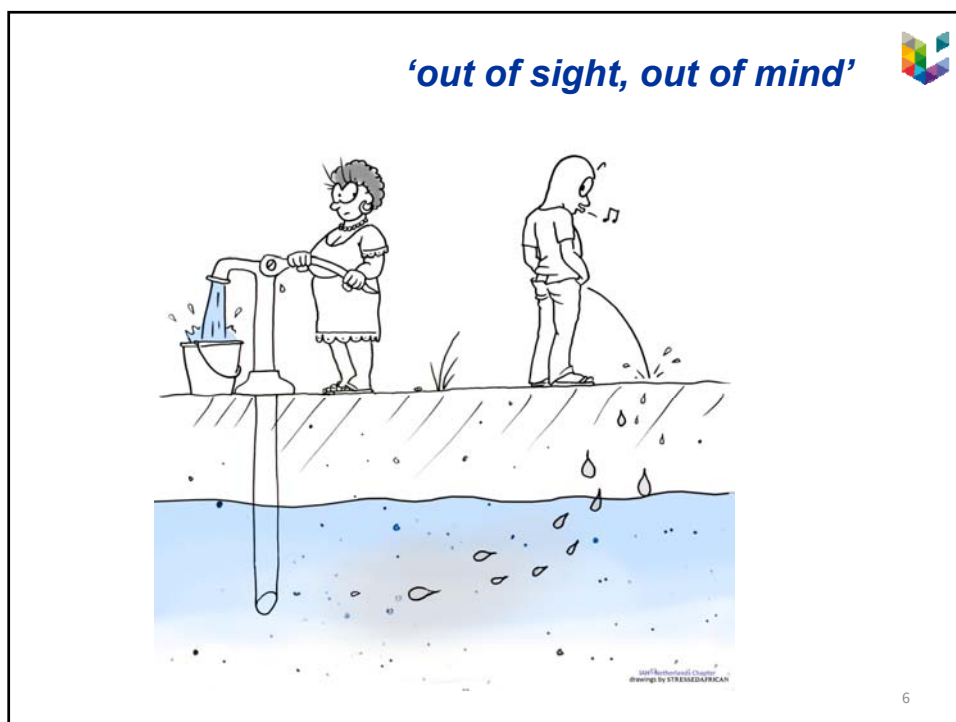
2



De mythe van de ondergrondse rivieren (dat bestaat alleen in een karstgebied)

➔ **... kalkstenen zijn opgelost door het grondwater**
...de breuken en porien worden karstopeningen en grotten

4



artesisch aquifer



111 - Netherlands Chapter
drawings by STRESSED AFRICAN

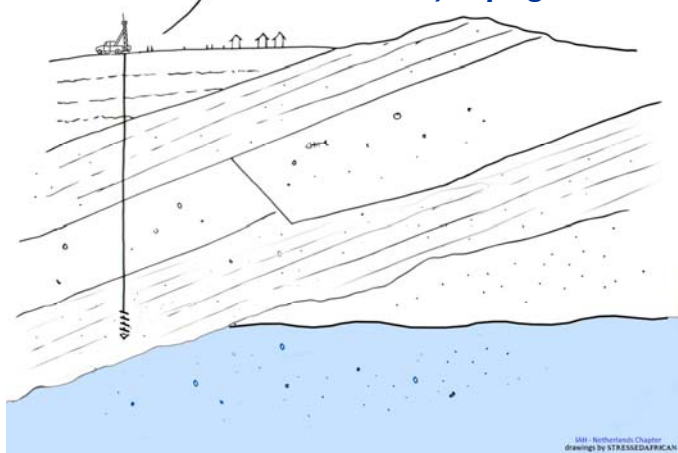
7

Om een goed begrip te hebben:



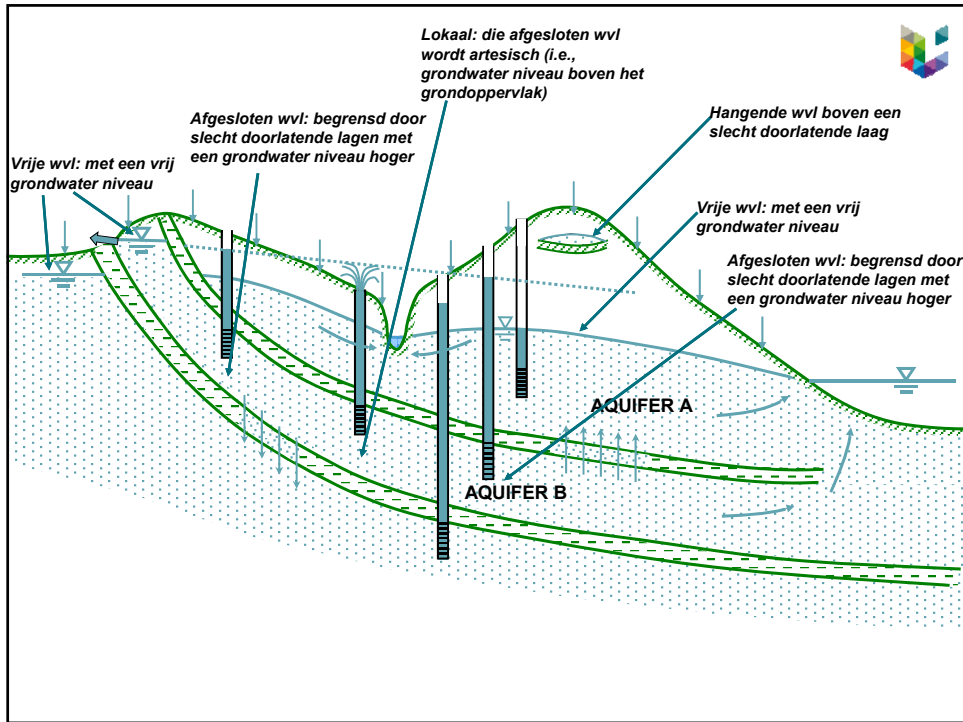
- 1) hydraulica
- 2) geologie (heterogeniteit)
- 3) topografie

Forget it,
no water here



111 - Netherlands Chapter
drawings by STRESSED AFRICAN

8



... dezelfde wvl kan vrij, afgesloten, en even artesisch worden, afhankelijk van de locatie in verband met hydrogeologische omstandigheden

Opmerking: freatisch wvl / aquifer ? ...de eerste wvl

Freatisch artesisch unit

Pouchet aquifer

Confining unit

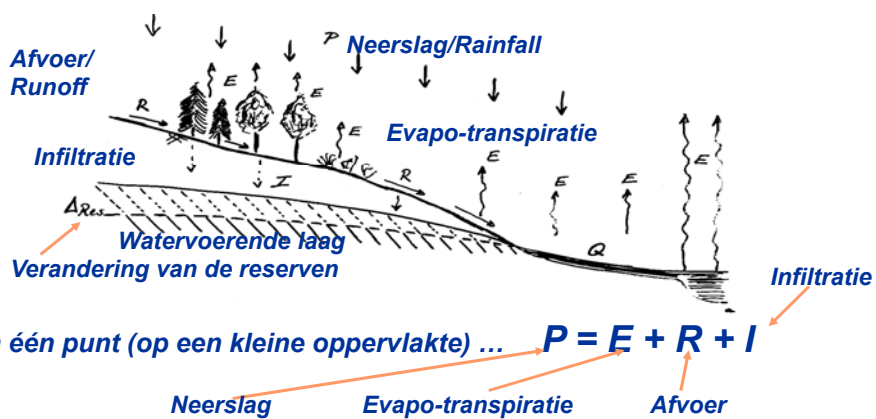
Aquifer

Confining unit

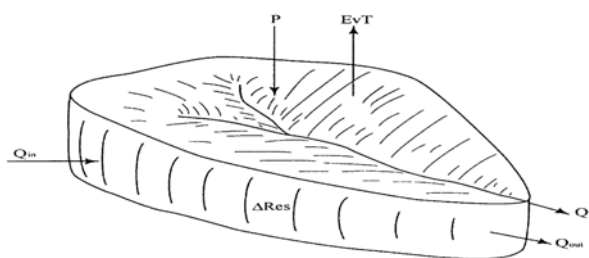
Confining unit

Hydrologische waterbalans

Instromingen = Uitstromingen +/- bergingsvariaties

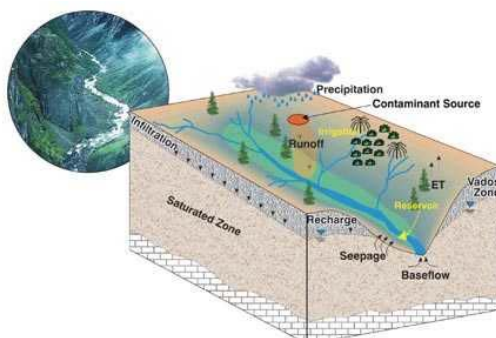


Hydrologische waterbalans ... in een bekken/stroomgebied



$P = E + R + Q_{gw} + \Delta Res$

gemeten debiet op de uitlaat van het bekken



Voorbeelden en geologische omstandigheden

het water dat in Parijs word gepompt en gedronken... was in Reims geïnfiltrteerd honderden jaar geleden !

The diagram shows a cross-section of a hydrogeological basin. From top to bottom, the layers are:

- alluviale w.v.l. met zanden en grinden; dikte van 10 – 50 m; interacties met rivieren** (alluvial aquifer with sands and gravels, 10-50m thick, interacting with rivers)
- afgesloten w.v.l. met zanden, zandstenen, kalkstenen; zeer lokale infiltratie** (confined aquifer with sands, sandstones, limestones; very local infiltration)
- vrij w.v.l. met krijten, zandstenen, kalkstenen; zeer uniforme infiltratie** (unconfined aquifer with clays, sandstones, limestones; very uniform infiltration)
- gespleten milieu met schisten, granieten; infiltratie** (fractured environment with schists, granites; infiltration)

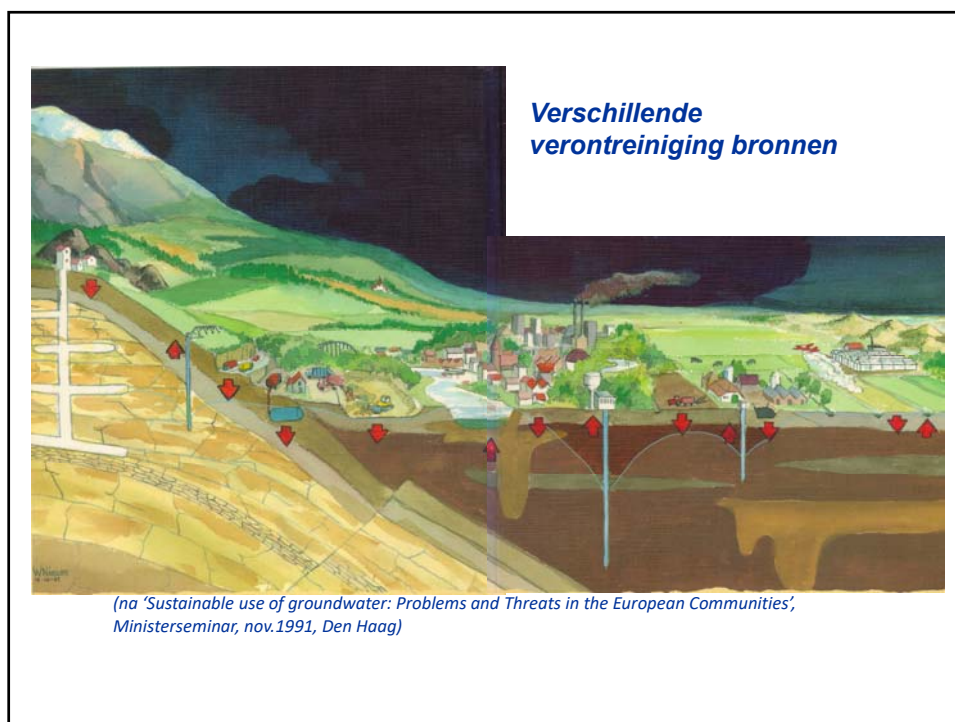
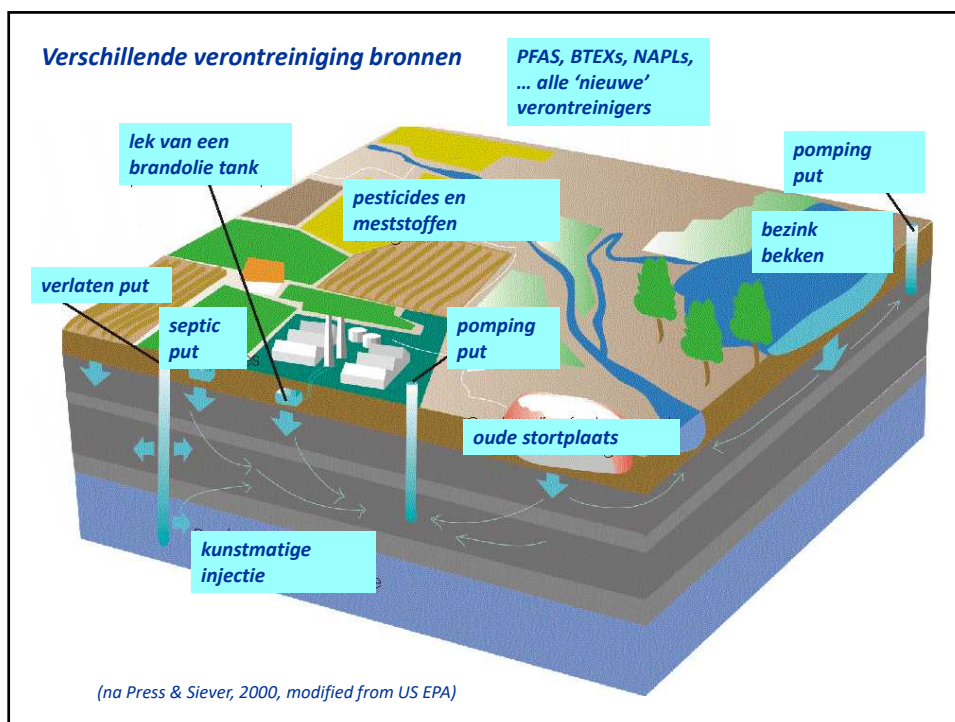
 The diagram also shows a river on the left, a city (Parijs) in the middle, and a well (50-200 m³/h) on the right. A source is cited as (BRGM website, 2002).

... een 'hydrogeologisch bekken' kan groter zijn en anders dan oppervlakte stroomgebied (topografisch/hydrologisch bekken)

Voorbeeld: Haspengauw

The diagram is a 3D geological cross-section of the Haspengauw region, oriented from SUD (South) to NORD (North). The vertical axis represents altitude in meters, ranging from 60 to 180. The horizontal axis represents distance in kilometers, from 0 to 2. The diagram shows a mountainous landscape with a central valley. Key features include:

- Topography:** A central mountain range with a valley.
- Subsurface:** A complex geological structure with various rock layers and faults.
- Hydrology:** A central river (Sambre) and a well (O.G.B.E.E.R.) are shown. Arrows indicate infiltration (P) and flow (C) directions.
- Altitude:** A vertical scale on the left side, ranging from 60 to 180 meters.
- Scale:** A horizontal scale at the bottom left, ranging from 0 to 2 kilometers.



'The global picture'



Eau sur Terre (estimation actuelle) à

1,387 million km³

100 %

-96.5 % eaux de mer

-0.96 % autres eaux salées

→ 2.54 % eaux douces

-1.75 % calottes glaciaires et glaciers

-0.02 % vapeur d'eau dans l'atmosphère, humidité du sol
+ permafrost

→ 0.77 % eaux douces 'disponibles'

0.01 % lacs et rivières

0.76 % eaux souterraines

→ **ratio (lacs + rivières) / eaux souterraines = 1/76 !!!**

Eau douce est distribuée spatialement de manière très inégale et n'est pas accessible aisément partout

→ eaux souterraines prennent une importance cruciale dans certaines circonstances (zones arides)

Renouvellement naturel des eaux souterraines ?

... dans les zones arides, production d'eau à partir d'eaux souterraines 'fossiles'
ce qui pose la question du développement durable

... **hides huge regional differences**

Terminologie



Eau 'utilisée':

→ l'eau peut être utilisée plusieurs fois, assurant différentes fonctions et services:
- eau recyclée (avec traitement)
- eau réutilisée (sans traitement)

Eau 'consommée':

→ eau qui n'est pas recyclée ou réutilisée (localement)
(i.e., évaporée, transpirée par les plantes ou transformée en produits ou nourriture ...qui sortent du cycle local)

Eau produite :

→ pompage, captage, extraction d'eau d'une source ou d'un aquifère ou d'une rivière : une partie peut être réinjectée (recyclée) ou réutilisée, alors qu'une autre peut être 'consommée'

Le problème majeur :

→ **irrigation: l'eau est en majorité évapo-transpirée vers l'atmosphère et quitte le bassin local**
→ **problème de quantité et de qualité (salinisation)**

Terminologie écologique



Water 'footprint' = Empreinte (écologique) de l'eau

(i.e., from a NGO called Water Footprint Network WFN)

➔ le volume total d'eau douce utilisée pour produire des biens et des services

LCA de l'eau *(i.e. Life Cycle assessment from the general LCA community)*

➔ grandeur(s) ou indicateur(s) quantifiant l'impact environnemental potentiel relié à l'usage de l'eau (pas le volume utilisé ou consommé mais l'impact potentiel sur l'environnement) *(Pfister et al. 2017)*

➔ **Estimations basées sur les LCA ≠ Empreinte Eau (WFN)**

mais

ces deux méthodes peuvent être considérées comme complémentaires

Les principaux débats concernent:

- perspectives globales vs locales
- les eaux 'vertes', 'bleues', 'grises' ...
- les interprétations diverses d'indices empiriques
 - ➔ 'water stress index'

19

Eau verte / Eau bleue / Eau grise

(based on Pfister et al. 2017)



Eau Verte = eau utilisée par les plantes pour leur croissance venant des précipitations locales

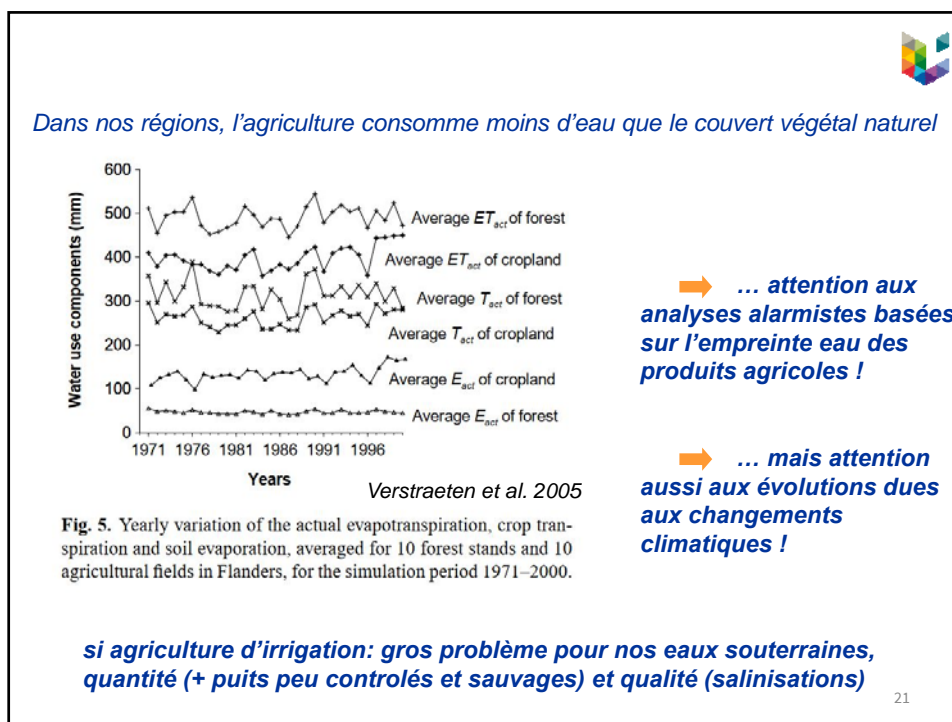
Eau Bleue = eau captée dans les rivières et aquifères

Eau Grise = eau recyclée localement mais (svt) avec détérioration de qualité

Exemple


- ➔ l'agriculture en Belgique (jusqu'à récemment) est (était) principalement alimentée par les eaux des précipitations ('rain-fed' agriculture) car utilisant l'humidité naturelle dans les sols donc utilisant les eaux vertes et très peu les eaux bleues
- ➔ l'empreinte eau d'un produit agricole est calculée en considérant toute l'eau verte comme consommée
- ➔ **mais** en Belgique une végétation naturelle (forêts) 'consomme' plus d'eau verte que l'agriculture, le vrai problème c'est l'irrigation (car on consomme de l'eau bleue)
- ➔ les estimations d'empreinte écologique pour l'eau (Water Footprint ass.) sont robustes mais peuvent être très biaisantes

20



Il est fondamental de distinguer entre une agriculture

- alimentée par l'humidité naturelle des sols (précipitations)
- irriguée



Exemples

- '1kg of beef needs 15,000 L of water' (WF assessment)

(mais si le boeuf a été élevé dans des prairies alimentées en eau naturellement par les précipitations, l'impact peut même être positif sur le bilan hydrique local)

→ dans nos régions, la plus grande part de ces 15,000 L = eau verte

- '1kg tomatoes needs 214 L of water' (WF assessment)

(ici la plus grande part est de l'irrigation nécessitant de pomper l'eau souterraine ou des eaux de surface car cultivées en zone aride ou en serres)

→ dans nos régions, la plus grande part de ces 214 L = eau bleue

22

'Water stress index' (?), 'water scarcity index', 'vulnerability to water shortage', ...

World Resource Institute
... making regularly the headlines in the media

17 COUNTRIES FACE EXTREMELY HIGH WATER STRESS

Source: wri.org/aqueduct
AQUEDUCT WORLD RESOURCES INSTITUTE

THE MIDDLE EAST AND NORTH AFRICA IS THE MOST WATER-STRESSED REGION ON EARTH

Source: wri.org/aqueduct
AQUEDUCT WORLD RESOURCES INSTITUTE

WRI (2013, 2015, 2019)

WORLD RESOURCES INSTITUTE

National Water Stress Rankings

EXTREMELY HIGH BASELINE WATER STRESS


1. Qatar	6. Libya	10. United Arab Emirates	14. Pakistan
2. Israel	7. Kuwait	11. San Marino	15. Turkmenistan
3. Lebanon	8. Saudi Arabia	12. Bahrain	16. Oman
4. Iran	9. Eritrea	13. India	17. Botswana
5. Jordan			

HIGH BASELINE WATER STRESS

18. Chile	25. Uzbekistan	32. Turkey	39. Niger
19. Cyprus	26. Greece	33. Albania	40. Nepal
20. Yemen	27. Afghanistan	34. Armenia	41. Portugal
21. Andorra	28. Spain	35. Burkina Faso	42. Iraq
22. Morocco	29. Algeria	36. Djibouti	43. Egypt
23. Belgium	30. Tunisia	37. Namibia	44. Italy
24. Mexico	31. Syria	38. Kyrgyzstan	

'Les chiffres affolants de la consommation en eau en Belgique' (Téléoustique)
'La Belgique parmi les régions les plus menacées par une pénurie en eau' (LLB et Le Soir)
'Watertekort in België...' (De Morgen, De Standaard, ...)

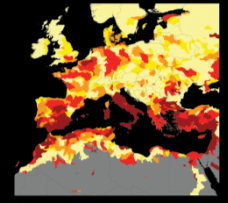
47. Sudan	53. South Korea	59. France	65. Indonesia
48. South Africa	54. Bulgaria	60. Kazakhstan	66. Brazil



THE MIDDLE EAST AND NORTH AFRICA IS THE MOST WATER-STRESSED REGION ON EARTH

BASELINE WATER STRESS

Category	Value	Color
Extremely High	> 80%	Red
High	40-80%	Orange
Medium	20-40%	Yellow
Low	10-20%	Light Green
Very Low	< 10%	Dark Green



Source: wri.org/aqueduct

AQUEDUCT WORLD RESOURCES INSTITUTE

The World Resource Institute = American Private Foundation funded by American donors including the Democratic Party, Coca Cola, and many others

Their work is not peer-reviewed.

Index = $\frac{\text{annual water use}}{\text{annual renewable water availability}}$ per country or region

→ peut sembler logique pour le grand public mais en fait complètement biaisé !

25



WRI (2013, 2015, 2019, ...)

THE MIDDLE EAST AND NORTH AFRICA IS THE MOST WATER-STRESSED REGION ON EARTH

BASELINE WATER STRESS

Category	Value	Color
Extremely High	> 80%	Red
High	40-80%	Orange
Medium	20-40%	Yellow
Low	10-20%	Light Green
Very Low	< 10%	Dark Green



Source: wri.org/aqueduct

AQUEDUCT WORLD RESOURCES INSTITUTE

Pourquoi y a t-il un problème ?

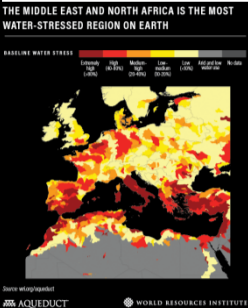
- **l'utilisation de l'eau est assimilée à la consommation** et en fait beaucoup de nos eaux 'usées' sont recyclées localement
- **l'index est biaisé** eau utilisée / disponibilité renouvelable de l'eau

Dans les pays arides, la disponibilité de l'eau renouvelable est très faible depuis de nombreuses années, donc ces pays ont été obligés d'adapter leur utilisation de l'eau. Ce stress existant déjà n'apparaît pas dans l'index.

Evidemment, le Niger ou le Mali sont nettement plus 'stressés' hydriquement que la Belgique mais cela n'apparaît pas dans l'index car c'est un rapport et le numérateur et le dénominateur sont tous les deux très petits.

26

WRI (2013, 2015, 2019, ...)



- en plus, en regardant les données utilisées :

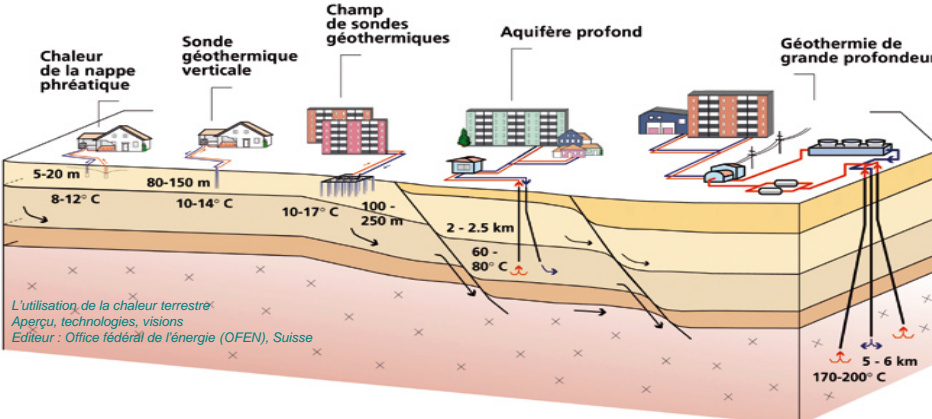
- estimates of countries' night-time water consumption on the basis of satellite images quantifying night-time lighting (!?)
- cooling water from nuclear power plants located in estuaries (e.g. the Scheldt) is totally taken into account, even though this in no way affects the local freshwater cycle
- gray water not accounted for

D'autres indicateurs plus fiables devraient être développés impliquant des études de sensibilité de notre société par rapport aux changements (climatiques, pratiques agricoles, usages de l'eau)

27

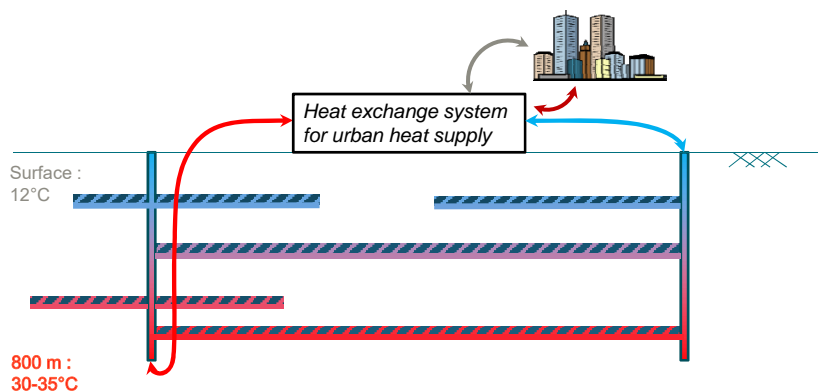
Importance des eaux souterraines pour la géothermie

- faible profondeur forages + pompages
- qq dizaines de mètres, circuits fermés en forage
- d'anciennes mines noyées
- ... et géothermie profonde, et très profonde



*L'utilisation de la chaleur terrestre
Aperçu, technologies, visions
Éditeur : Office fédéral de l'énergie (OFEN), Suisse*

Systemes de basse température circuits 'ouverts' dans d'anciennes mines



Difficultés

- géométrie complexe du sous-sol et des anciennes exploitations
- court-circuit possible entre point de pompage et réinjection

29

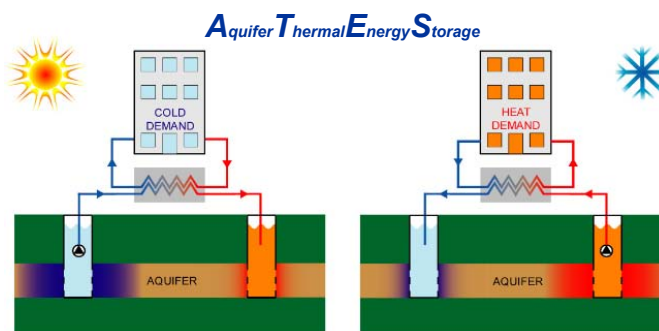
Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?

➔ Injection et pompage (système ouvert)

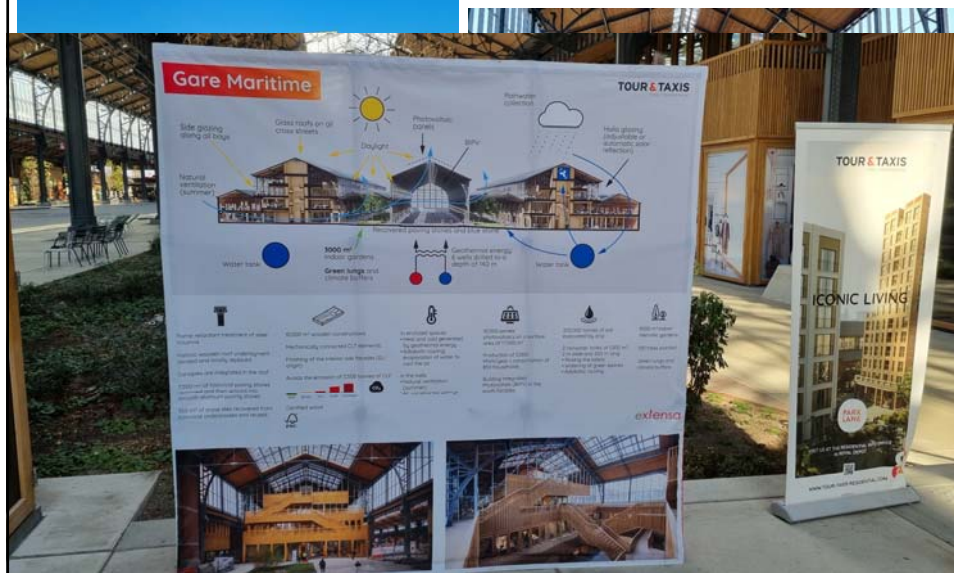
Les potentialités sont en principe grandes ...

... mais à vérifier en pratique

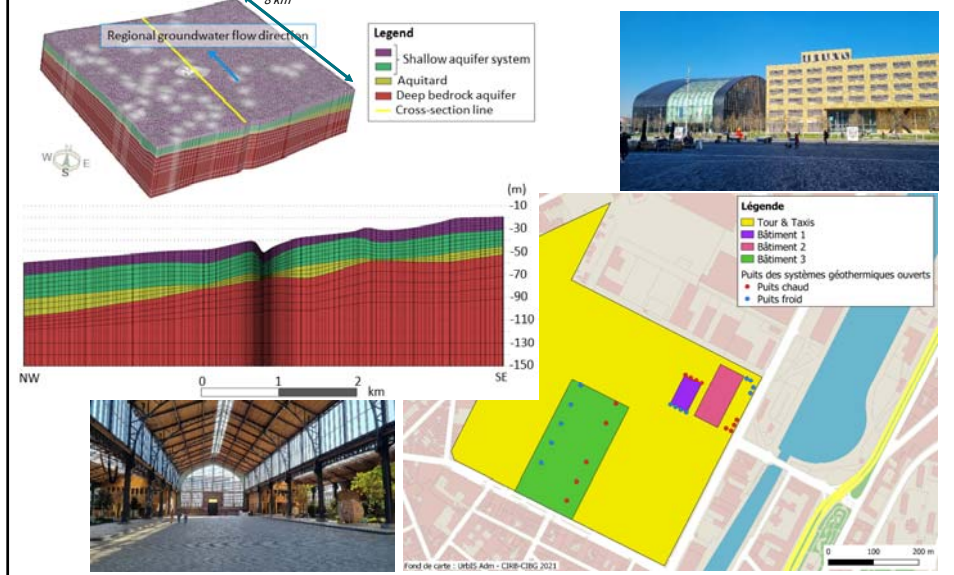
- jouer sur l'alternance saisonnière (geothermie + geocooling)
- espérer que la migration de chaleur au sein du sous-sol soit faible
- étudier les impacts
- étudier les rendements

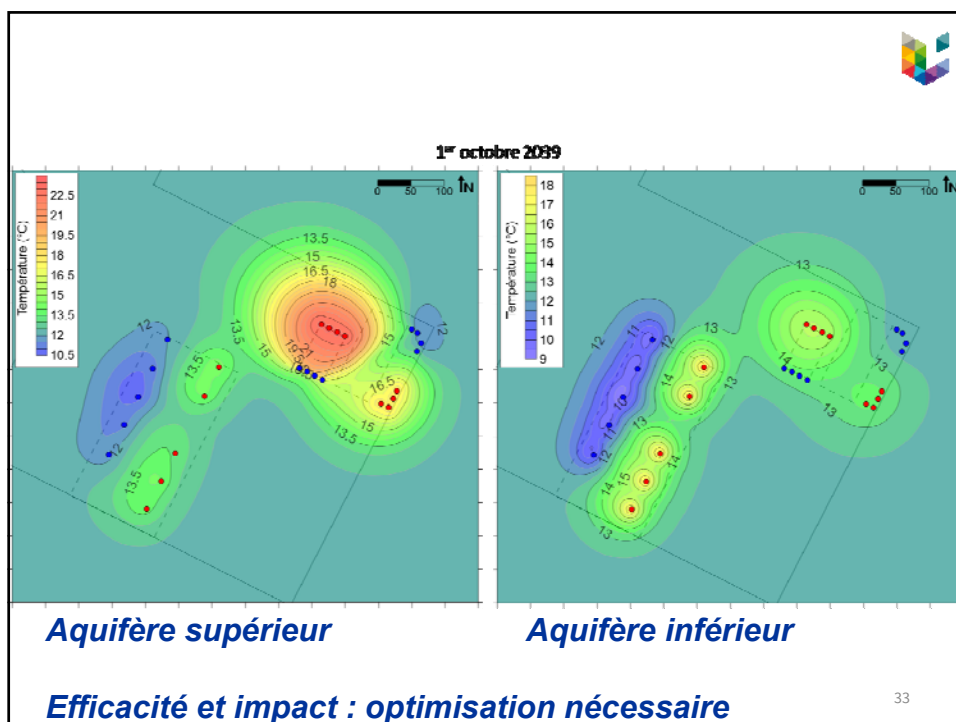


Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?
 → efficacité et impact sont très liés : optimisation nécessaire



Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?
 → Efficacité et impact sont très liés : optimisation nécessaire





33

Watervoerende Lagen en Grondwater in België
Aquifères et Eaux Souterraines en Belgique
 A. Damarguez & J. Walraevens

Hydrogeology: ground water science and engineering
 Allan D. Dawdy

HYDROGÉOLOGIE APPLIQUÉE
 A. Damarguez & J. Walraevens

COMMENT ON FAIT DE L'EAU POTABLE?
 ON PRESSE DES ÉPONGES?
 TU SAIS TOI?
 ON TORD DES POISSONS?
 NON?

Merci !

34

References (among others)



- ▶ Allen, R.G. 2008. Why do we care about ET? *Southwest Hydrology*7(1): 18-19.
- ▶ Alley, W.M. 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resources Research*20(8): 1137-1149.
- ▶ Berger, M., Finkbeiner, M. 2010. Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? *Sustainability*2: 919-944; doi:10.3390/su2040919
- ▶ Brouyère, S., Carabin, G. and Dassargues, A., 2004. Climate change impacts on groundwater reserves: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium, *Hydrogeology Journal*12(2):123-134.
- ▶ Brutsaert, W. 2005. *Hydrology: an introduction*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ▶ Cai, X., Wallington, K., Shafiee-Jood, M. and L. Marston. 2018. Understanding and managing the food-energy-water nexus – opportunities for water resources research. *Advances in Water Resources*111: 259-273.
- ▶ Condon, L.E. and R.M. Maxwell. 2014. Feedbacks between managed irrigation and water availability: diagnosing temporal and spatial patterns using an integrated hydrologic model. *Water Resources Research*50(3): 2600-2616.
- ▶ Cosgrove, W.J. and D.P. Loucks. 2015. Water management: current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*51: 4823-4839.
- ▶ Dassargues A., 2018. *Hydrogeology: groundwater science and engineering*, 472p. Taylor & Francis CRC press, Boca Raton.
- ▶ Dassargues A. 2020. *Hydrogéologie appliquée : science et ingénierie des eaux souterraines*, 512p. Dunod. Paris.
- ▶ de Marsily, G. 2009. *L'eau, un trésor en partage (in French)*. Paris : Dunod.
- ▶ Devlin, J.F. and M. Sophocleous. 2005. The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. *Hydrogeology Journal*13: 549-554.
- ▶ De Vries, J.J. and I. Simmers. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*10: 5-17.
- ▶ Doble, R.C. and R.S. Crosbie. 2017. Review: Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater. *Hydrogeology Journal*25: 3-23.
- ▶ Foster, S. and A. MacDonald. 2014. The 'water security' dialogue: why it needs to be better informed about groundwater. *Hydrogeology Journal*22 (7): 1489-1492.
- ▶ Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Therrien, R., Orban, P. and A. Dassargues. 2009. Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology*373(1-2): 122-138.
- ▶ Goderniaux, P., Brouyère, S., Blenkinsop, S., Burton, A., Fowler, H.J., Orban, P. and Dassargues, A., 2011, Modelling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios, *Water Resources Research*47(12), W12516
- ▶ Healy, R.W. 2010. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge MA: Cambridge University Press.

35

References (among others, following)



- ▶ Kim, J.H. and R.B. Jackson. 2012. A global analysis of groundwater recharge for vegetation, climate, and soils. *Vadose Zone Journal* 11(1).
- ▶ Loáiciga, H.A. 2003. Sustainable groundwater exploitation. *Int. Geology Review*44(12): 1115-1121.
- ▶ Mannan, M., Al-Ansari, T., Mackey, H. R., Al-Ghamdi, S.G. 2018. Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment, *Journal of Cleaner Production*, 193: 300-314.
- ▶ Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. In: *The state and movement of water in living organism*. 19th Symp. Society of Experimental Biology 205-234.
- ▶ Peck, A.J. and D.R. Williamson. 1987. Effects of forest clearing on groundwater. *Journal of Hydrology*94: 47-65.
- ▶ Pfister, S., Boulay, A.-M., Berger, M., Hadjikakou, M., Motoshita, M., Hess, T., Ridoutt, B., Weinzettel, J., Scherer, L., Döll, P., Manzano, A., Núñez, M., Verones, F., Humbert, S., Buxmann, K., Harding, K., Benini, L., Oki, T., Finkbeiner, M., Henderson, A. 2017. Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016) "A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA", *Ecological Indicators*, 72: 352-359.
- ▶ Ringler, C., Bhaduri, A. and R. Lawford. 2013. The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency?, *Current Opinion in Environmental Sustainability*5(6): 617-624.
- ▶ Rocha, D., Feyen, J. and A. Dassargues, A. 2007. Comparative analysis between analytical approximations and numerical solutions describing recession flow in unconfined hillslope aquifers. *Hydrogeology Journal*15: 1077-1091.
- ▶ Scanlon, B.R., Ruddell, B.L., Reed, P.M., Hook, R.I., Zheng, C., Tidwell, V.C. and S. Siebert. 2017. The food-energy-water nexus: transforming science for society. *Water Resources Research*53: 3550-3556.
- ▶ Simmons, J. 2015 Water in the energy industry. *Geoscientist*25(10) 10-15.
- ▶ Smerdon, B.D. and J.E. Drewes. 2017. Groundwater recharge: The intersection between humanity and hydrogeology. *Journal of Hydrology*555: 909-911.
- ▶ The World Resources Institute and The Coca-Cola Company (2011). "Aqueduct Water Risk Atlas Global Maps 1.0." Available online at /aqueduct.
- ▶ Van Camp, M., de Viron, O., Pajot-Métivier, G., Casenave, F., Watlet, A., Dassargues, A. and M. Vanclooster. 2016. Direct measurement of evapotranspiration from a forest using a superconducting gravimeter. *Geophysical Research Letters*43(10): 225-231.
- ▶ Verstraeten, W.W., Muys, B., Feyen, J., Veroustraete, F., Minnaert M., Meiresonne, L. and A. de Schrijver. 2005. Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, EGU, 9 (3): 225-241.
- ▶ Wheeling, K. 2016. The coming blue revolution. *EOS*97(4):29.
- ▶ WRI Aqueduct Global Maps: <https://www.wri.org/research/aqueduct-global-maps-21>

36