ISI — INITIATIVES ET SOLUTIONS INTERCULTURELLES
WWW.INTERCULTURELLES.ORG



COMPRENDRE LES CYCLES HYDROLOGIQUES ET CULTIVER L'EAU

POUR RESTAURER LA FÉCONDITÉ DES SOLS ET PRENDRE SOIN DU CLIMAT

DOCUMENTATION

Comprendre les cycles hydrologiques et cultiver l'eau
pour restaurer la fécondité des sols et prendre soin du climat

Version : 2
Date : 25 juillet 2022

Ce document est disponible dans deux formats PDF librement téléchargeables sur le site de l'association d'*ISI — Initiatives et Solutions Interculturelles* :

Comprendre-les-cycles-hydrologiques-et-cultiver-l-eau.pdf (pour impression)
Comprendre-les-cycles-hydrologiques-et-cultiver-l-eau-WEB.pdf

https://interculturelles.org/project/cultiver-l-eau/

Cette page propose la dernière version de cette documentation, qui est appelée à évoluer et s'enrichir : n'hésitez pas à contacter l'auteur ou l'association *ISI* pour suggérer des corrections ou proposer des compléments d'information.

Cette documentation est librement reproductible selon la licence :
Attribution — Pas d'utilisation commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions
CC BY-NC-SA 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0

Rédaction : Jean-Luc Galabert
Relecture et correction : Vénuste Kayimahe, Marc Debacker
Édition et révision : Bruno Gouteux

Citation :

Jean-Luc Galabert, *Comprendre les cycles hydrologiques et cultiver l'eau pour restaurer la fécondité des sols et prendre soin du climat*, Documentation *ISI — Initiatives et Solutions Interculturelles*, Version 2, 25 juillet 2022.
URL : https://interculturelles.org/project/cultiver-l-eau/

Contacter l'auteur :

Jean-Luc Galabert
galabertjeanluc@gmail.com
+250 780 934 851
www.lavierebelle.org

ISI Initiatives Solutions Interculturelles

www.interculturelles.org
etudes@interculturelles.org

COMPRENDRE LES CYCLES HYDROLOGIQUES ET CULTIVER L'EAU

POUR RESTAURER LA FÉCONDITÉ DES SOLS ET PRENDRE SOIN DU CLIMAT



PRÉSENTATION DES THÉMATIQUES ABORDÉES

CYCLES DE L'EAU

Où l'on découvrira qu'il n'existe pas un, mais de multiples cycles de l'eau jusque là trop peu étudiés, que les cycles du carbone et de l'eau sont liés, et que la connaissance de ces cycles permettrait de cultiver l'eau.

L'EAU ET LES SOLS

Où l'on apprendra que les sols peuvent être des éponges pour peu qu'y soit cultivée la vie dans sa diversité.

L'EAU ET LES PLANTES

Où l'on montrera que les forêts génèrent de la pluie sur les terres émergées et que le végétal crée de l'eau nouvelle.

L'EAU ET LE CLIMAT

Où l'on verra que le principal gaz à effet de serre n'est pas le CO2, mais la vapeur d'eau, et que restaurer les cycles de l'eau perturbés pourrait être un outil majeur à la portée de l'humanité pour lutter contre le réchauffement climatique.

INITIATIVES RÉGÉNÉRATRICES

Où l'on s'émerveillera de la démonstration qu'il est possible de transformer des déserts en édens fertiles et féconds.

TABLE DES MATIÈRES

1| LE CYCLE DE L'EAU



P. 9

Où l'on découvrira qu'il n'existe pas un, mais de multiples cycles de l'eau jusque là trop peu étudiés, que les cycles du carbone et de l'eau sont liés, et que la connaissance de ces cycles permettrait de cultiver l'eau.

Émergence du concept de cycle de l'eau — page 8 / Représentations actuelles des cycles de l'eau — page 10 / Notes sur l'eau — page 12 / L'arbre, les forêts et les pluies — page 14 / Le phénomène de pompe biotique — page 14 / Composés volatils végétaux et fongiques et extension des pluies — page 16 / Rôle des champignons — page 18 / Rios Voadores : les rivières volantes — page 19 / Le rôle des plantes — page 22 / Réévaluer le rôle des plantes dans la compréhension des cycles de l'eau — page 22 / L'hypothèse de Christophe Colomb — page 24 / Premiers débats sur le rôle de la déforestation dans la perturbation du cycle de l'eau et le risque de changement climatique global — page 25 / Altérations des cycles hydrologiques par les humains — page 26 / Cycle et demi-cycle de l'eau selon Viktor Schauberger — page 27 / Conditions d'un cycle complet de l'eau — page 28 / Conditions d'un demi-cycle de l'eau — page 29 / Phases des cycles hydrologiques selon Viktor Schauberger — page 30 / Voies négligées des cycles de l'eau — page 31 / Voie de la condensation — page 31 / La forêt naturelle s'architecture pour maximiser la condensation — page 33 / Chemins creux et condensation — page 34 / Plantes condensatrices — page 35 / Les Arbres fontaines — page 36 / Voie de la photosynthèse — page 37 / Note sur la photosynthèse — page 38 / Origines des sources — page 39 / Voie de la Biomasse — page 40 / Voie racinaire — page 42

2| L'EAU ET LE SOL

P. 45



Où l'on apprendra que les sols peuvent être des éponges pour peu qu'y soit cultivée la vie dans sa diversité.

Comment sont apparus les sols ? — page 46 / La propriété d'un sol vivant est de retenir l'eau sans perdre sa structure — page 48 / Test de stabilité structurale à l'eau — page 49 / L'eau circule avec la vie — page 51 / Comment l'eau est-elle stockée dans le sol ? — page 53 / Des petits trous, des petits trous, toujours des petits trous… — page 55 / Influence des plantes et en particulier des arbres sur les eaux souterraines — page 59 / Les sols nus sont exposés à l'érosion hydrique — page 60

3| L'EAU ET LES PLANTES

P. 63



Où l'on montrera que les forêts génèrent de la pluie sur les terres émergées et que le végétal crée de l'eau nouvelle.

Sans eau, pas de plantes — page 64 / Réaction de Fenton — page 66 / Quand arroser et fertiliser affaibli les plantes — page 67 / Acides aminés essentiels issus de la biodiversité de la chaîne alimentaire dans le sol — page 68 / Recréer des variétés végétales résistantes aux maladies et tolérantes au stress hydrique — page 69 / L'irrigation par l'eau des nappes phréatiques n'est pas la solution — page 70 / L'utilisation des eaux de nappes fossiles concourt à l'effet de serre et à l'élévation du niveau des océans — page 72 / Les problématiques du manque et de l'excès d'eau doivent être traitées conjointement — page 74

4| L'EAU ET LE CLIMAT



P. 79

Où l'on verra que le principal gaz à effet de serre n'est pas le CO2, mais la vapeur d'eau, et que restaurer les cycles de l'eau perturbés pourrait être un outil majeur à la portée de l'humanité pour lutter contre le réchauffement climatique.

L'eau et le climat — page 79 / L'eau est-elle la grande oubliée de l'analyse du changement climatique et de ses causes ? — page 80 / Impacts des modes d'occupation et de gestion des sols sur le cycle de l'eau et le « réchauffement climatique » — page 83 / Fonctions régulatrices de l'eau — page 85 / Fonction thermorégulatrice de la pluie et des nuages — page 85 / Fonction thermorégulatrice de l'eau et de la végétation — page 86 / L'arbre comme climatiseur — page 88/ L'effet de refroidissement des plantes — page 89 / Changer de paradigme ! — page 93 / Perturbation des sols et réchauffement climatique — page 96 / « Planète verte » versus « planète désertique » — page 98

5| INITIATIVES RÉGÉNÉRATRICES

P. 101



Où l'on s'émerveillera de la démonstration qu'il est possible de transformer des déserts en édens fertiles et féconds.

Initiatives régénératrices — page 101 / Reverdir la planète n'est pas une utopie — page 102 / Restauration du plateau de loess en Chine — page 103 / Renaissance d'une forêt primaire atlantique disparue au brésil — page 105 / Création d'une « forêt syntropique » au Brésil — page 106 / Naissance d'un bocage au Sahel — page 108 / Reverdir le désert jordanien — page 111 / Transformer les déserts minéraux urbains en villes éponges — page 113



Sans eau, pas de vie. Sous ses différentes formes et états, l'eau est indispensable à l'émergence et au maintien de la vie et compose l'essentiel des êtres vivants.

Les résultats des recherches les plus récentes confirment un savoir ancien, mais trop souvent oublié : les relations entre l'eau, les plantes et la vie du sol sont non seulement étroites, mais consubstantielles. Ils démontrent également la justesse d'un proverbe africain qui énonce : « *La différence entre désert et jardin ce n'est pas l'eau, c'est l'Homme* ».

Des Africains avaient donc compris que l'humain est capable du meilleur comme du pire et ils avaient formulé il y a déjà longtemps d'une manière brève et profonde ce que de doctes personnes nomment aujourd'hui l'anthropocène.

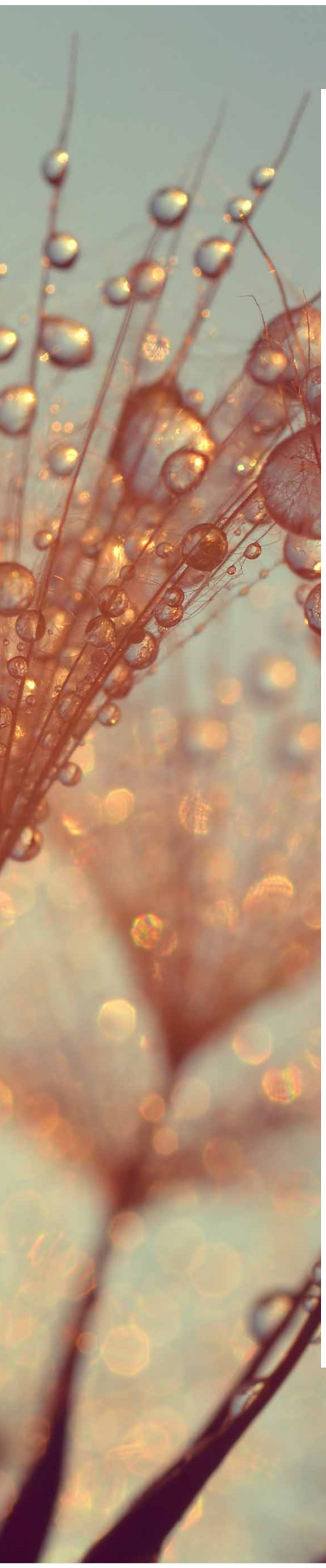
Des humains ont créé et continuent de générer la majorité des déserts par leur maladresse, leur ignorance et leur hubris. Mais, la bonne nouvelle est que, si une minorité dominante a pu faire d'une partie de la terre un enfer déserté par l'eau, les plantes et le sol, de nombreuses expériences montrent que tout un chacun peut contribuer à en faire un Éden en apprenant à cultiver l'eau.

L'eau, comme le sol et les plantes, se cultive.

Comprendre les interrelations de ce triptyque et en prendre soin, c'est prendre soin de la vie même.

La vie se cultive
la mort aussi.
À nous de choisir.

Jean-Luc Galabert



Conformément à notre vocation d'être des passeurs de savoirs et d'expériences, le présent texte est un maillage et un agencement des fruits des recherches de multiples femmes et hommes.

Notre contribution propre à consisté à identifier ces recherches, sans tenir compte d'aucune frontière académique ni d'aucune hiérarchie des disciplines.

Indisciplinés et sans préjugés, nous avons ainsi convié sans distinction paysans, agronomes, sourciers, hydrologues, climatologues, historiens, poètes, écologues, géographes, géologues, gardes forestiers, biologistes, philosophes, physiciens, architectes, paysagistes, jardiniers… à un banquet des savoirs, une auberge espagnole où chacun apporte son plat d'expérience du monde.

Ignorant malheureusement les langages des non-humains, nous avons convoqué des porte-parole des arbres et autres plantes, des champignons, des animaux, des bactéries et autres micro-organismes, des molécules, des sols et de l'air pour qu'ils témoignent de l'importance de l'eau pour chacun.

Nous avons ensuite cherché à mettre en forme la substance de chaque recherche d'une manière aussi simple, mais rigoureuse que possible. Puis, nous nous sommes efforcés de relier les recherches des uns et des autres pour composer un paysage des connaissances actuelles accessible à toute personne qui prendra le temps de s'y attarder.

Enfin, nous avons pris soins d'illustrer chaque idée développée au fil du texte par des photographies, dessins, schémas pour permettre de les appréhender avec un autre registre de sensibilité.

Nous espérons que cet agencement permettra à chaque lectrice et lecteur d'être sensible et d'appréhender les enjeux des cycles de l'eau et de la vie.

Cette brochure est aussi conçue pour permettre d'imaginer et de mettre en œuvre des actions concrètes de préservation et de restauration de l'intégrité des cycles hydrologiques.

En entamant notre exploration des savoirs liés à l'eau, nous ne soupçonnions pas à quel point reconstituer une partie du puzzle des connaissances sur l'eau et ses cycles allait bouleverser notre appréhension du monde.

Espérant que votre propre périple dans ce texte nourrisse aussi votre sensibilité et votre intelligence, nous vous souhaitons une bonne lecture.

ISI —Initiatives et Solutions Interculturelles

Cette documentation est réalisée
par Jean-Luc Galabert pour l'association
ISI — Initiatives et Solutions Interculturelles.

ÉMERGENCE DU CONCEPT DE CYCLE DE L'EAU

Les premières réflexions chinoises sur le cycle de l'eau remontent au IXe avant l'ère chrétienne.

Elles apparaissent notamment dans *Le livre des Odes* composé à cette période. Vers la fin du IVe siècle, la dynamique du cycle hydrologique est formulée pour la première fois par Fan Li (536-448 BC) :

> *« Le vent est le chi du ciel, et la pluie est le chi du sol. Le vent souffle selon la période de l'année, et la pluie tombe à cause du vent. On peut dire que le chi du ciel se déplace vers le bas tandis que le chi du sol se déplace vers le haut. »*

Chuang Tzu (c. 300-400 BC) écrit :

> *« N'est-ce pas les nuages qui forment la pluie, et la pluie qui s'évapore qui forme les nuages ? »*

Environ deux cents ans plus tard, le « *Traité apocryphe sur la carte des rivières* » d'un auteur anonyme mentionne également que « *l'eau sur les montagnes s'évapore pour devenir des nuages* », et Shen Hsu définit les nuages comme « *l'humidité évaporée des marais et des lacs.* »

Entre le VIIe et le Ier siècle av. J.-C., la littérature grecque relative aux composantes du cycle de l'eau est particulièrement riche.

Pas moins d'une trentaine d'auteurs — philosophes, naturalistes, poètes, physiciens, géographes — ont abordé cette thématique.

Au cours de ces siècles, le cycle de l'eau a été progressivement interprété dans des termes assez proches des concepts actuels.

Dans l'ouvrage Les météorologiques, Aristote (384-322 BC) formule sa représentation du cycle de l'eau ainsi :

> *« Le soleil, en se déplaçant comme il le fait, déclenche des processus de changement, de devenir et de décomposition, et par son intermédiaire l'eau la plus fine et la plus douce est chaque jour transportée et se dissout en vapeur et s'élève jusqu'à la région supérieure, où elle est condensée à nouveau par le froid et retourne ainsi à la terre ».*

1| LE CYCLE DE L'EAU

OÙ L'ON DÉCOUVRIRA QU'IL N'EXISTE PAS UN, MAIS DE MULTIPLES CYCLES DE L'EAU JUSQUE LÀ TROP PEU ÉTUDIÉS, QUE LES CYCLES DU CARBONE ET DE L'EAU SONT LIÉS, ET QUE LA CONNAISSANCE DE CES CYCLES PERMETTRAIT DE CULTIVER L'EAU.



Chuang Tzu méditant devant une chute d'eau

REPRÉSENTATIONS ACTUELLES DES CYCLES DE L'EAU

LE SCHÉMA CI-DESSOUS FORMALISE LE QUASI-CONSENSUS DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE DES CLIMATOLOGUES SUR LE CYCLE DE L'EAU.

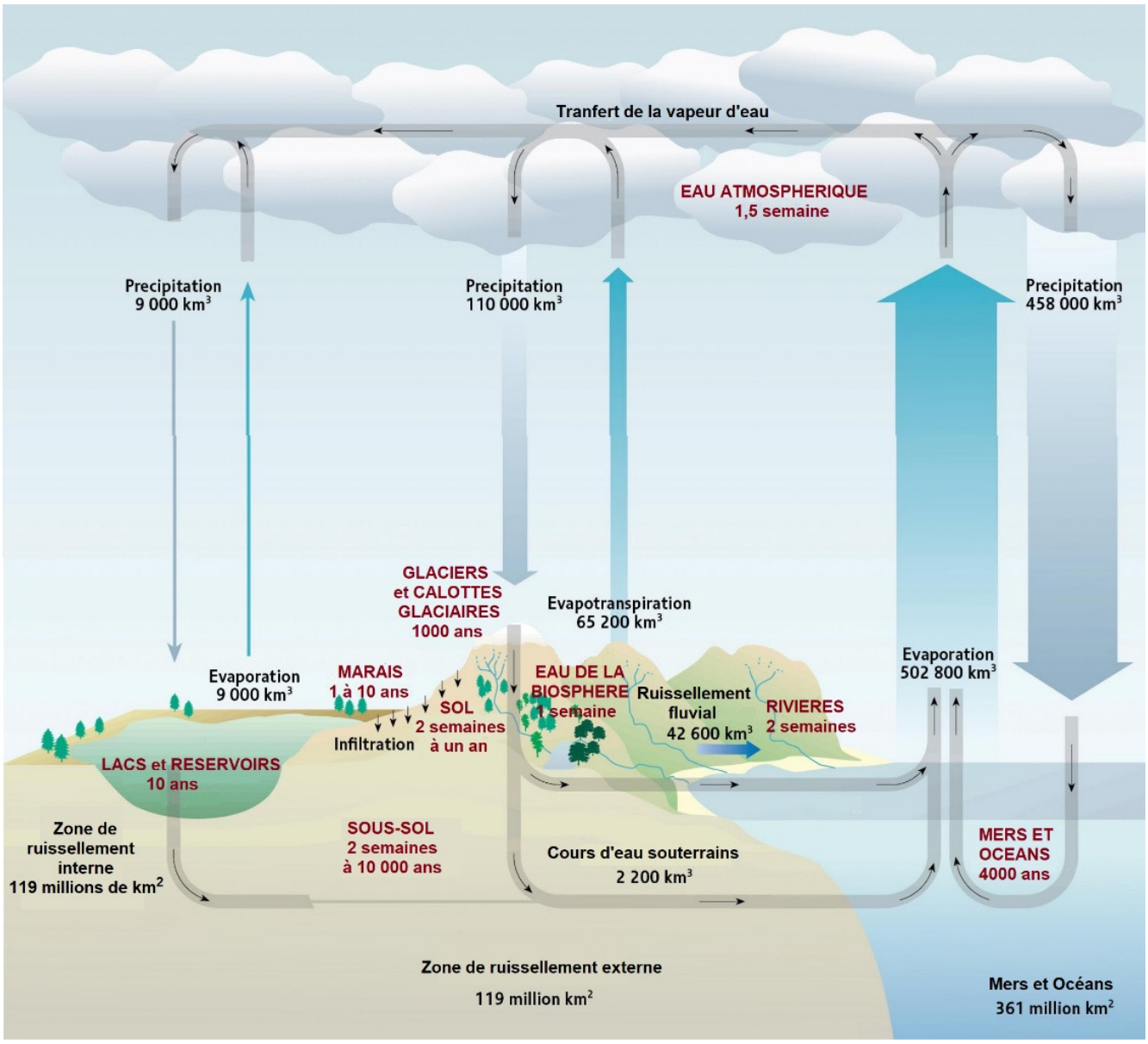


Illustration 1

Source : Igor A. Shiklomanov, State Hydrological Institute de Saint Petersburg) et UNESCO 1999 ; Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 1994; Freeze, Allen, John, Cherry, Groundwater, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1979.

SEULS 10 % DE L'HUMIDITÉ OCÉANIQUE SE PRÉCIPITENT SUR LES TERRES

L'illustration 1 ci-contre schématise les différentes formes sous lesquelles la plupart des scientifiques considèrent que l'eau circule au sein du cycle hydrologique.

L'épaisseur des flèches qui est proportionnelle aux volumes d'eau transportés et permet de visualiser l'importance relative des flux.

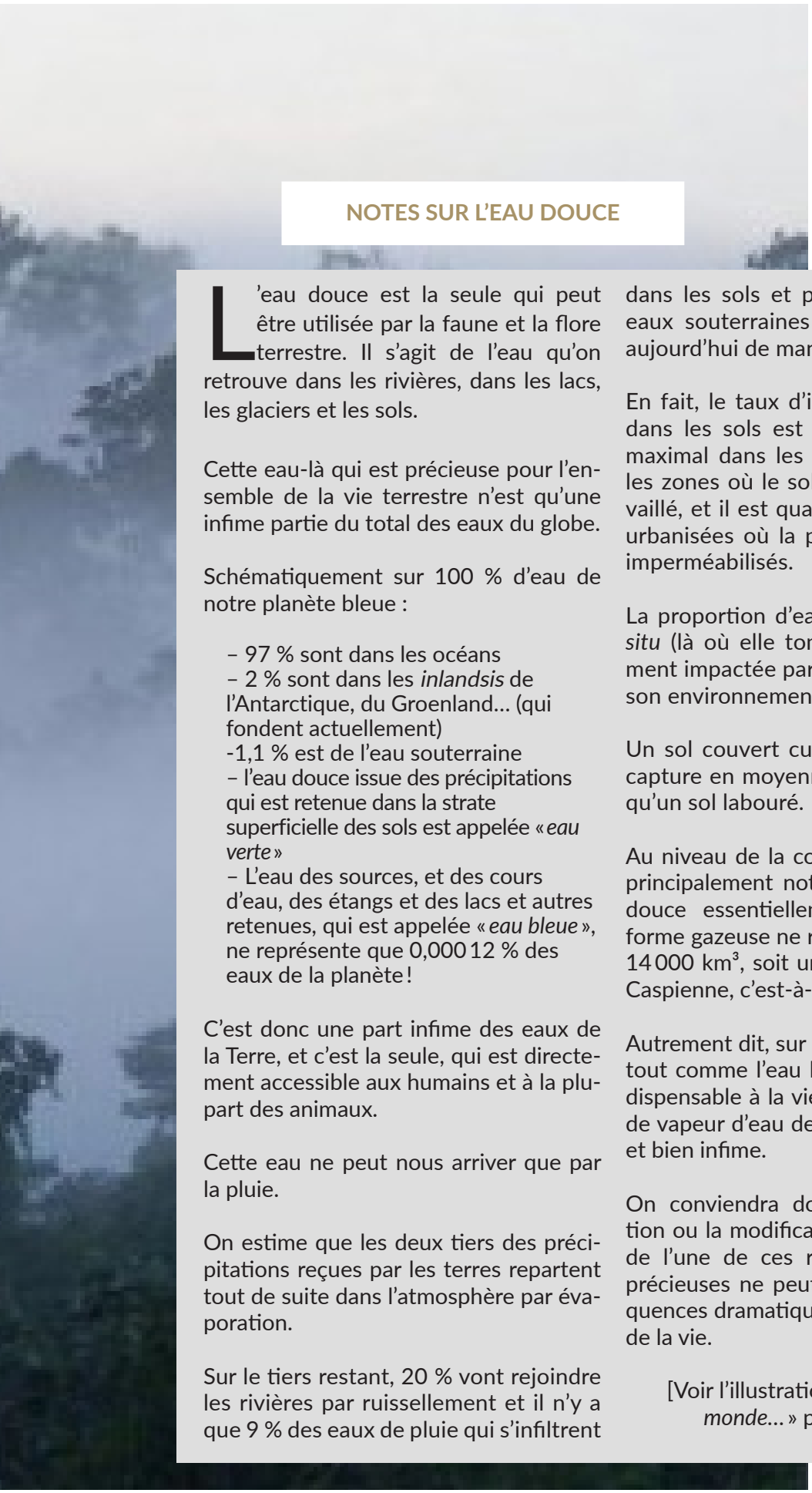
Les indications écrites en rouge indiquent le temps de résidence et de renouvellement complet de l'eau dans les différents milieux.

En résumé, selon ce schéma repris notamment par le GIEC :

- *il pleut plus au-dessus des océans qu'au-dessus des terres ;*
- *90 % de l'eau qui s'évaporent au-dessus des océans et des mers retournent directement dans les océans par le biais des précipitations ;*
- *seuls 10 % de l'humidité océanique se précipitent sur les terres ;*
- *plus de la moitié des précipitations sur les continents provient de l'évapotranspiration des plantes et des sols qui compensent l'aridité plus importante des reliefs ;*
- *environ 35 % du volume d'eau formé sur les continents sont renvoyés dans les océans sous forme de ruissellement des rivières, des eaux souterraines et des glaciers ;*
- *les volumes et la distribution des nappes d'eau souterraines sont mal connus, mais on estime que seules les eaux les plus superficielles (environ 3,6 millions de km3) circulent activement dans le cycle de l'eau ;*
- *parmi ces eaux souterraines, 10 % rejoindraient les océans sans transiter par les cours d'eau.*
- *une partie considérable du débit des rivières et de la percolation des eaux souterraines n'atteint donc jamais l'océan, car elle s'est évaporée dans des zones de ruissellement interne ou a rejoint des bassins intérieurs dépourvus de voies d'accès à l'océan ;*
- *ces bassins sans exutoires qui peuvent avoir des dizaines de milliers, voire des millions d'années sont appelés aquifères ou nappes phréatiques fossiles ; depuis environ un siècle, ces nappes fossiles sont, à l'instar du pétrole, exploitées de plus en plus intensément ; comme le pétrole, il s'agit d'une ressource non renouvelable, sauf à l'échelle de temps géologiques.*

Ce que ne montre pas ce schéma, et que nous décrirons plus loin, c'est le volume d'eau formé sur les terres émergées par d'autres voies que celle des précipitations.

PLUS DE LA MOITIÉ DES PRÉCIPITATIONS SUR LES CONTINENTS PROVIENT DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DES PLANTES ET DES SOLS



NOTES SUR L'EAU DOUCE

Nous reprenons ici des données communiquées par l'hydrologue Emma Haziza lors de différentes interventions publiques.

L'eau douce est la seule qui peut être utilisée par la faune et la flore terrestre. Il s'agit de l'eau qu'on retrouve dans les rivières, dans les lacs, les glaciers et les sols.

Cette eau-là qui est précieuse pour l'ensemble de la vie terrestre n'est qu'une infime partie du total des eaux du globe.

Schématiquement sur 100 % d'eau de notre planète bleue :

– 97 % sont dans les océans
– 2 % sont dans les *inlandsis* de l'Antarctique, du Groenland… (qui fondent actuellement)
-1,1 % est de l'eau souterraine
– l'eau douce issue des précipitations qui est retenue dans la strate superficielle des sols est appelée « *eau verte* »
– L'eau des sources, et des cours d'eau, des étangs et des lacs et autres retenues, qui est appelée « *eau bleue* », ne représente que 0,000 12 % des eaux de la planète !

C'est donc une part infime des eaux de la Terre, et c'est la seule, qui est directement accessible aux humains et à la plupart des animaux.

Cette eau ne peut nous arriver que par la pluie.

On estime que les deux tiers des précipitations reçues par les terres repartent tout de suite dans l'atmosphère par évaporation.

Sur le tiers restant, 20 % vont rejoindre les rivières par ruissellement et il n'y a que 9 % des eaux de pluie qui s'infiltrent dans les sols et peuvent rejoindre les eaux souterraines que l'homme capte aujourd'hui de manière intensive.

En fait, le taux d'infiltration des pluies dans les sols est très variable : il est maximal dans les forêts, minimal dans les zones où le sol est mis à nu et travaillé, et il est quasi nul dans les zones urbanisées où la plupart des sols sont imperméabilisés.

La proportion d'eau de pluie captée *in situ* (là où elle tombe) est donc largement impactée par l'action humaine sur son environnement.

Un sol couvert cultivé en semis direct capture en moyenne six fois plus d'eau qu'un sol labouré.

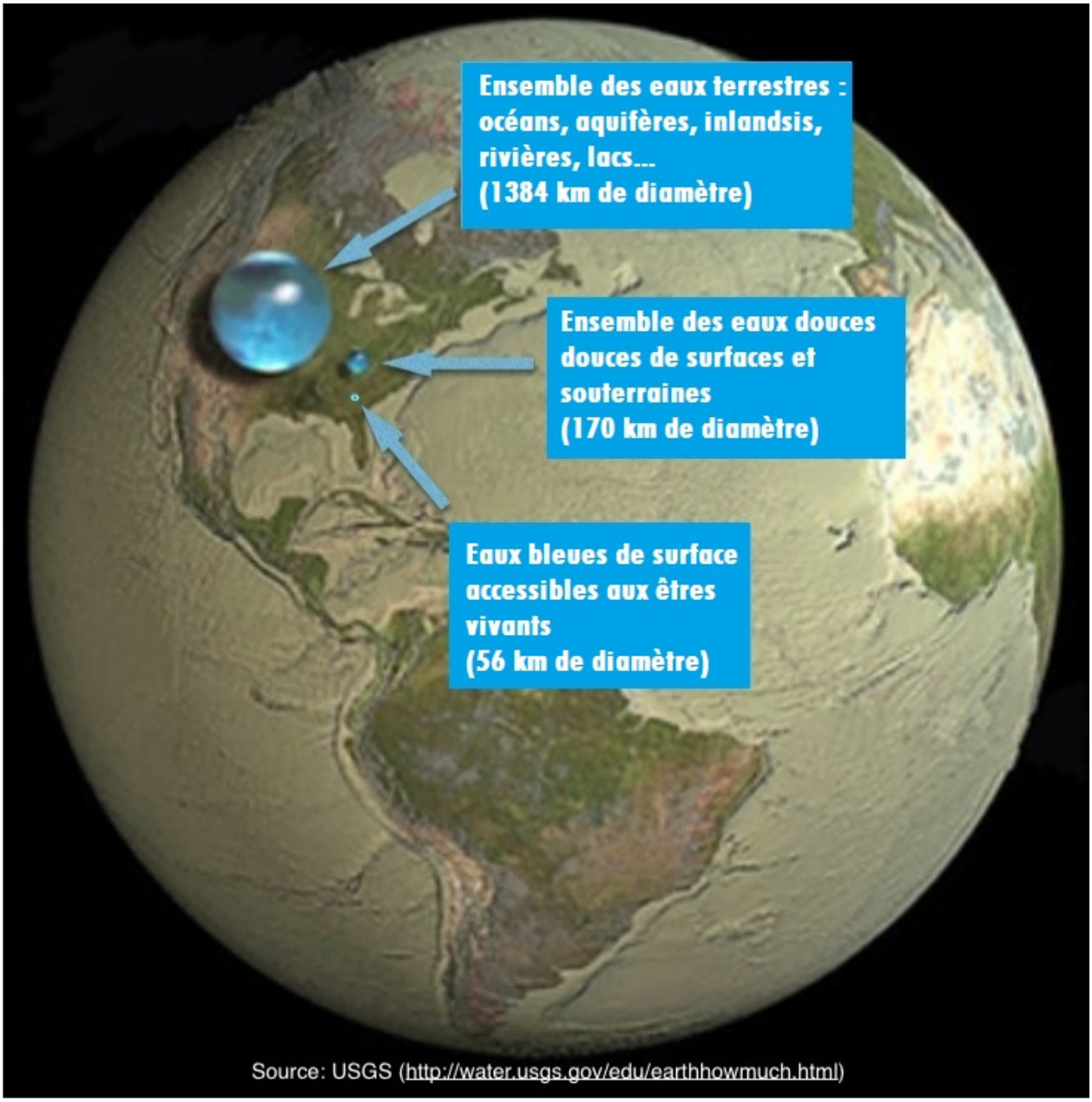
Au niveau de la couronne qui compose principalement notre atmosphère, l'eau douce essentiellement présente sous forme gazeuse ne représente qu'environ 14 000 km^3, soit un septième de la mer Caspienne, c'est-à-dire presque « *rien* ».

Autrement dit, sur « *notre planète bleue* », tout comme l'eau liquide de surface indispensable à la vie animale, la quantité de vapeur d'eau de l'atmosphère est bel et bien infime.

On conviendra donc que la dégradation ou la modification de la proportion de l'une de ces ressources infiniment précieuses ne peut qu'avoir des conséquences dramatiques pour les équilibres de la vie.

[Voir l'illustration « *Toute l'eau du monde…* » page suivante]

TOUTE L'EAU DU MONDE…



Représentation de l'ensemble de l'eau présente sur Terre
(d'après Howard Perlman, USGS / Jack Cook, *Woods Hole Oceanographic Institution* / Adam Nieman)

Toute l'eau du monde tient en fait dans une petite sphère et l'eau douce nécessaire à la vie terrestre dans une sphère minuscule.

L'ARBRE, LES FORÊTS ET LES PLUIES

Le schéma des cycles de l'eau vu plus haut indique que l'évapotranspiration de l'eau de pluie tombée sur les continents crée un cycle plus important que celui qui part des océans.

Hors des zones océanes, la pluie est surtout le produit de la transpiration et de l'émission de composés organiques volatiles par le couvert végétal.

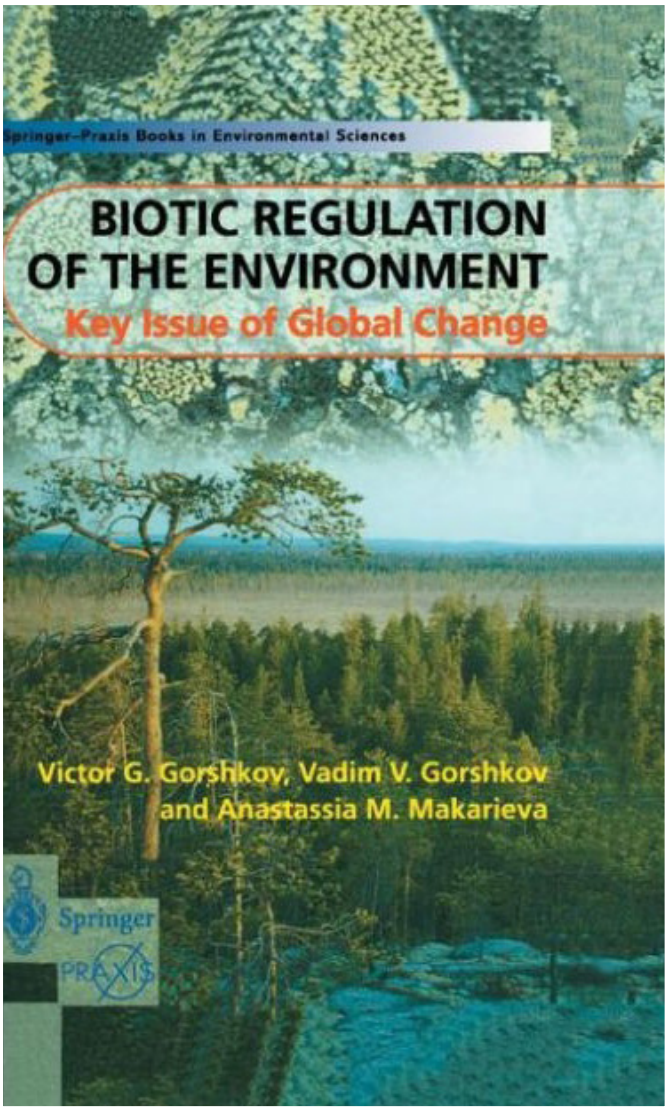
Une terre sans forêts produit bien moins de nuages et de précipitations qu'une terre boisée. Ainsi, contrairement aux idées reçues, ce n'est pas parce qu'on manque d'eau qu'il n'y a plus de forêts, mais c'est parce qu'il n'y a plus de forêts que l'eau manque. La végétation et en particulier les arbres sont les « gestionnaires » de la pluie, ils la génèrent, l'attirent et permettent son infiltration.

LE PHÉNOMÈNE DE POMPE BIOTIQUE

Deux physiciens russes, Anastassia Makarieva et Victor Gorshkov, ont proposé une explication du lien entre couvert forestier et précipitation en démontrant que la présence de forêts crée un phénomène qu'ils ont nommé « pompe biotique ».
La pompe biotique est un mécanisme par lequel les forêts naturelles attirent l'humidité formée au-dessus des océans en orientant les vents et les nuages vers l'intérieur des terres, expliquent Gorshkov et Makarieva.

Selon les auteurs de cette théorie, c'est l'évaporation et la condensation issue des forêts, et non les différences de température dans l'atmosphère, qui sont à l'origine des vents apportant des précipitations au-dessus des continents. En générant une forte évaporation et une forte.

Condensation, les forêts créent des zones de basse pression et le jeu des différences de pression atmosphérique attire de l'air humide vers les zones boisées.



Les schémas de la page suivante illustrent ce phénomène[1].

Pour comprendre la dynamique qu'ils représentent, il faut avoir à l'esprit que le volume atmosphérique se réduit à un rythme plus élevé dans les zones où l'évaporation et la condensation — figurées par les flèches verticales — sont plus intenses.

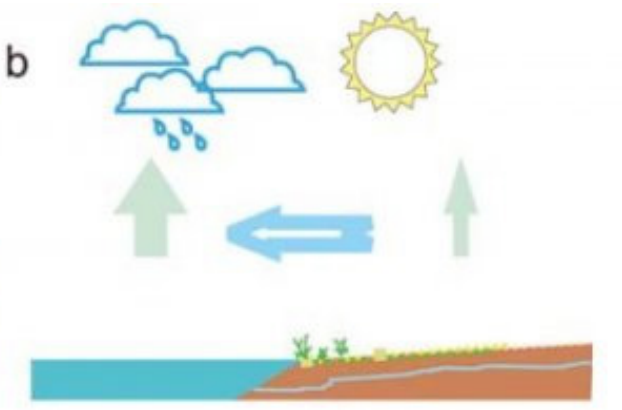
La basse pression qui en résulte attire de l'air humide supplémentaire — figuré par les flèches horizontales ouvertes — provenant de zones où l'évaporation et la condensation sont plus faibles.

Cela conduit à un transfert net d'humidité atmosphérique vers les zones à forte évaporation et condensation.

1 Douglas Sheil and Daniel Murdiyarso, 'How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis', BioScience April 2009/Vol. 59 No. 4, BioScience p. 341.



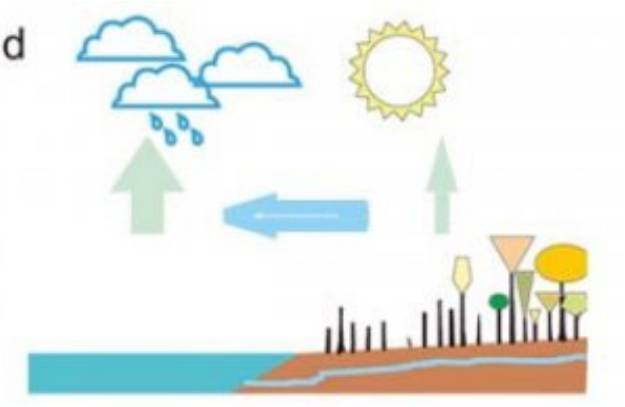
(**a**) En plein soleil, les forêts maintiennent une évaporation plus élevée que les océans et attirent donc l'air humide des océans.



(**b**) Dans les déserts, l'évaporation est faible et l'air est attiré vers les océans.



(**c**) Dans les climats tempérés saisonniers, l'énergie solaire peut être insuffisante pour maintenir l'évaporation des forêts à des taux supérieurs à ceux des océans pendant une saison sèche d'hiver, et les océans aspirent l'air des terres. Cependant, en été, les taux élevés d'évaporation des forêts sont rétablis comme dans le dessin (a).



(**d**) Avec la disparition des forêts, l'évaporation nette sur les terres diminue et peut être insuffisante pour contrebalancer celle des océans : l'air s'écoule vers la mer et les terres deviennent arides et incapables d'entretenir des forêts.



(**e**) Sur les continents humides, une couverture forestière continue maintenant une évaporation élevée permet d'aspirer de grandes quantités d'air humide depuis la côte. L'air sec, non représenté sur les diagrammes, revient à des altitudes plus élevées, des régions plus humides aux régions plus sèches, pour compléter le cycle, et le recyclage interne de la pluie contribue de manière significative aux modèles de précipitations à l'échelle continentale.



Anastassia M. Makarieva et Victor G. Gorshkov expliquent le phénomène de pompe biotique de la manière suivante[1] :

« La pompe biotique est un mécanisme à travers lequel les forêts naturelles créent et contrôlent les vents allant de l'océan vers les terres, apportant de l'humidité à toutes les formes de vie terrestre. Les vents ont tendance à souffler des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Mais comment un système de basse pression se forme-t-il au-dessus des terres ?

La pression de l'air dépend du nombre de molécules de gaz. Lorsque la vapeur d'eau se condense, elle disparaît de la phase gazeuse ; le nombre de molécules de gaz diminue, et la pression de l'air chute. Ainsi, si l'on parvient à maintenir un processus de condensation au-dessus des terres, celles-ci deviennent une zone de basse pression permanente.

La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère de la Terre possède une propriété physique remarquable : elle est instable vis-à-vis de la condensation. Si un volume d'air contenant une grande quantité de vapeur se retrouve poussé vers le haut, l'air se refroidira à tel point que la vapeur se condensera. À cause de cette instabilité, s'il existe une quantité suffisante de vapeur d'eau dans la partie inférieure et chaude de l'atmosphère, une condensation aura lieu.

Le feuillage et les branches d'un arbre possèdent une surface totale beaucoup plus grande que la projection de ce même arbre sur le sol. Ainsi, l'évaporation issue d'une forêt apporte plus de vapeur d'eau à l'atmosphère que l'évaporation provenant d'une surface d'eau ouverte de même taille. Par conséquent, la condensation se produit plus facilement au-dessus des forêts qu'au-dessus des océans. Les forêts, plutôt que les océans, deviennent les zones de basse pression où les vents humides convergent.

Pour compléter le cycle, l'humidité retombe sur les terres sous forme de précipitations puis retourne vers l'océan sous forme d'écoulement dans les rivières. »

COMPOSÉS VOLATILS VÉGÉTAUX ET FONGIQUES ET EXTENSION DES PLUIES

D'autres recherches ont montré qu'en Amazonie, par le phénomène d'évapotranspiration, la même eau de pluie tombe jusqu'à six fois tous les cinq cents kilomètres plus loin vers l'ouest avec les vents dominants et atteint ainsi la Cordillère des Andes.

1 Entretien avec Anastassia M. Makarieva et Victor G. Gorshkov — https://news.mongabay.com/2012/02/

Ce phénomène n'est pas spécifique à cette région. Il est universel pour peu qu'il y ait des forêts.

Les arbres et les champignons créent également un autre cycle beaucoup plus petit. Ce cycle est lié aux composés volatils émis par les arbres feuillus (les résineux n'en émettent pas) et aux spores qui sont émises par les champignons à certains moments particuliers. Ces composés volatils vont servir de noyaux de condensation des nuages et la pluie qui en résulte va tomber quatre à cinq kilomètres plus loin.

Francis Hallé, codécouvreur des composés volatils émis par les arbres, décrit leur fonction ainsi :

« Un arbre est une énorme surface qui envoie dans l'atmosphère des tonnes de vapeur d'eau, ce qui est presque de sa fonction.

Il y a une vingtaine d'années, une équipe de chercheurs dont je faisais partie a travaillé au Gabon et s'est aperçue que chaque espèce d'arbre émettait des molécules volatiles et spécifiques. Les Anglais ont appelé, "volatil organic compound" ces molécules organiques qui partent dans l'atmosphère.

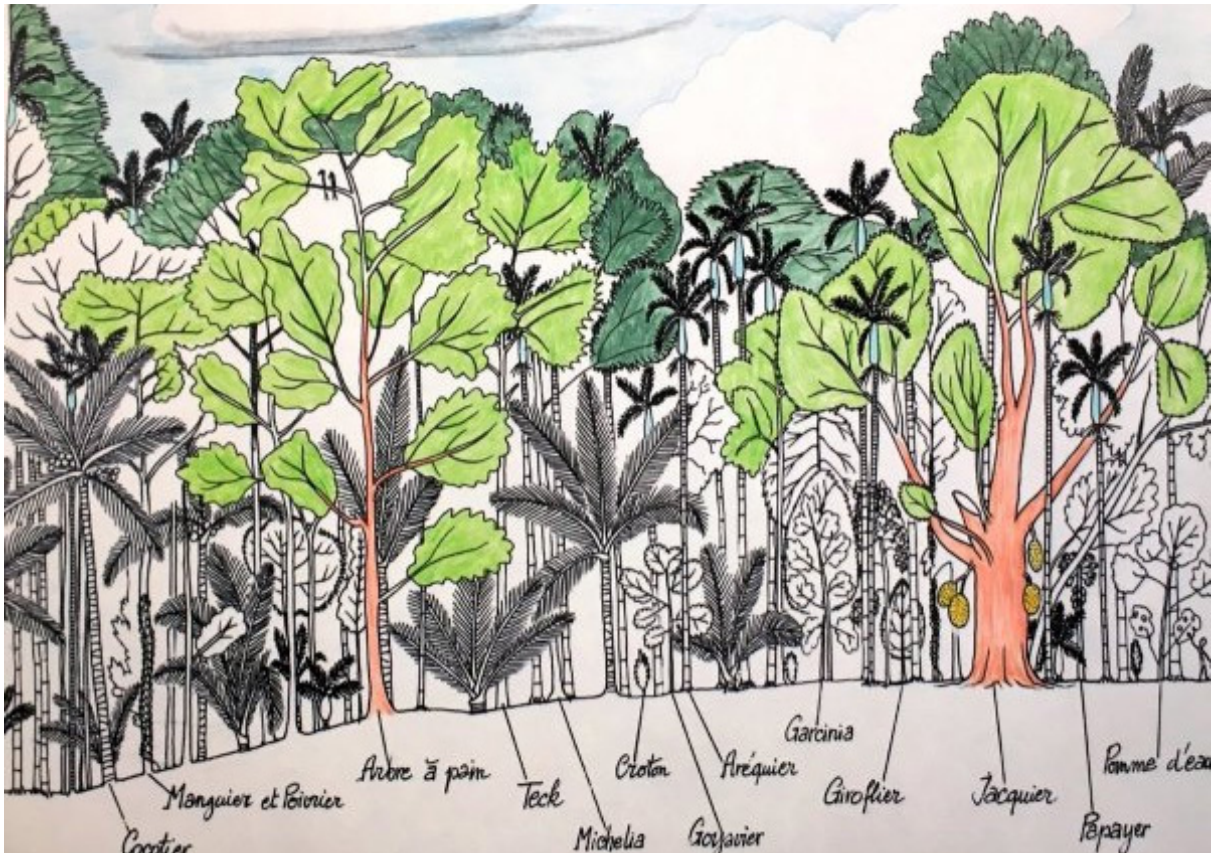
Très récemment, un chercheur brésilien, Antonio Nobre a trouvé le rôle de ces émissions.

Il ne suffit pas que de la vapeur d'eau soit présente dans l'atmosphère pour qu'il pleuve. Il faut des germes autour desquels s'agglomèrent des molécules d'eau de plus en plus nombreuses, de sorte qu'elles finissent par former une goutte d'eau qui tombe.

Ces germes peuvent être de la poussière, mais il n'y en a pas au-dessus de la forêt amazonienne. Ce sont alors les composés organiques volatils qui servent de germes.

Ainsi, non seulement les arbres envoient la vapeur d'eau dans l'atmosphère, mais ils sont également capables de contrôler le retour de cette eau sous forme de pluie. Quand j'étais tout jeune chercheur en Afrique, je me rappelle avoir aperçu en pleine savane un nuage à l'horizon.

Après avoir mis le cap dans cette direction, nous avons découvert une petite forêt en dessous de ce nuage. Quelques hectares de forêt suffisent pour qu'il pleuve. »



Dessin de Francis Hallé



RÔLE DES CHAMPIGNONS

Avec les composés volatils, les spores des champignons concourent également à la génération des pluies :

« Les champignons, rappelle Hervé Covès, émettent leurs spores quand il fait lourd et qu'il y a de l'orage dans l'air. À ce moment-là, les spores du champignon tombent sous le chapeau.

Or son chapeau transpire et cette transpiration génère un petit vortex, un petit courant d'air ascendant qui va créer un minuscule courant d'air.

Quand il fait lourd, il n'y a pas de courants d'air l'air est stable au-dessus des champignons, mais ce petit vortex va induire un effet dit de venturi[1] qui va aspirer les minuscules spores tombées sous le chapeau qui vont se retrouver en suspension entre le haut de la canopée et les champignons.

À l'échelle des spores, les gouttes d'eau sont énormes. Que va-t-il se passer lorsqu'une fois l'orage déclenché, d'énormes gouttes d'eau vont rencontrer de toutes petites spores en suspension ? Que va-t-il se passer lorsqu'une fois l'orage déclenché, d'énormes gouttes d'eau vont rencontrer de toutes petites spores en suspension (à l'échelle des spores, les gouttes d'eau sont énormes).

Et bien, contrairement à ce qu'on pourrait penser il ne va pas y avoir collision parce que les gouttes d'eau sont extrêmement aérodynamiques.

Les minuscules spores vont être déviées, elles vont glisser derrière les gouttes d'eau et être reprises dans les turbulences des gouttes d'eau et vont ainsi remonter la pluie grâce aux petits vortex qui se créent dans les turbulences des gouttes d'eau.

De goutte d'eau en goutte d'eau, les spores de champignons remontent jusqu'au cœur des nuages.

Arrivées là, les spores de champignons qui étaient hydrofuges deviennent hydrophiles et se transforment en noyaux de condensation qui vont créer de nouvelles gouttes d'eau qui vont retomber quand l'orage se déplace un, deux, trois ou quatre kilomètres plus loin.

Ce phénomène très simple permet que là où il y a des arbres et donc des champignons, les spores de champignons qui sont émises accentuent les précipitations et étendent les surfaces où il pleut, car comme l'eau de pluie va se ré-évaporer après être tombée, il y aura de nouveaux cycles de l'eau intermédiaire à des échelles différentes. »

— Hervé Covès, *Intervention lors des rencontres de Paysage* à Marciac (juillet 2020)



Vesse-de-loup éjectant ses spores (photographie : Lesmalvern)

1 L'effet Venturi, du nom du physicien italien Giovanni Battista Venturi, est le nom donné à un phénomène de la dynamique des fluides, selon lequel un fluide en écoulement subit une dépression là où la vitesse d'écoulement augmente, ou encore là où la section d'écoulement se rétrécit.

RIOS VOADORES : LES RIVIÈRES VOLANTES



Rivière volante et rivière terrestre

Antonio Nobre qui a participé à l'élucidation de la fonction des émissions de composés biogéniques libérés par la forêt amazonienne a également décrit l'étonnant phénomène des *Rios Voadores* (« *rivières volantes* »).

Ce scientifique brésilien, agronome de formation a choisi cette image poétique pour décrire les immenses masses d'eau en suspension qui s'écoulent dans les airs en se déplaçant sous l'effet des vents au-dessus de la forêt amazonienne de l'océan vers le continent tout comme l'eau des rivières se déplace sous l'effet de la gravité.

Ce phénomène avait été découvert à l'origine par le pilote Gérard Moss en survolant l'Amazonie pour étudier le réseau hydrographique brésilien.

Gérard Moss s'est associé avec le Pr Antonio Nobre pour l'étudier dans le cadre du projet scientifique baptisé « *Rios Voadores* ».

Il a ainsi pu être démontré que les responsables du phénomène n'étaient autres que les arbres qui le provoquent par l'effet combiné de l'évapotranspiration, de l'émission de composés biogéniques volatils et des vents.

Les « *rivières volantes* » sont une déclinaison du phénomène de pompe biotique évoqué plus haut.

Dans un entretien, Antonio Nobre livre cette explication du phénomène des rivières volantes :

« De la même façon que nous suons lorsqu'il fait chaud, les arbres se mettent à transpirer lorsque le climat s'assèche. Ils expulsent de grandes quantités de vapeur d'eau qui montent dans les airs, un peu comme des "geysers verts".

Puis en s'élevant, ce gaz se met peu à peu à refroidir jusqu'à se condenser et former des gouttelettes. Cette transformation provoque une chute de la pression atmosphérique au-dessus de la forêt et un effet de succion qui attirent l'air situé au-dessus de l'océan voisin vers le continent. Un air chargé d'humidité.

Ce processus est tellement efficace qu'il arrive à tirer cet air humide sur des milliers de kilomètres jusqu'à l'intérieur des grands continents comme l'Amérique du Sud. Tout au long de sa trajectoire, la vapeur d'eau se recycle au-dessus de la forêt, en générant des pluies et en captant la transpiration des arbres.





Puis en progressant vers le reste du continent et en quittant la forêt, elle provoque des précipitations, alimentant en eau des zones qui, sans ce phénomène, seraient bien plus sèches. »

– Antonio Nobre, entretien avec Jeremy Hance pour la revue Mongabay, janvier 2013

L'existence des rivières volantes et le phénomène de pompe biotique présenté plus haut répondent à plusieurs mystères qui intriguaient les chercheurs depuis longtemps.

Le Brésil est positionné entre l'équateur et une latitude de 30° S. Une zone qui, sur tous les autres continents, est caractérisée par la présence de déserts comme celui du Sahara et un climat plutôt aride et sec.

Or, le Brésil est loin d'être un désert, il est même exceptionnellement riche en eau.

Cette particularité s'explique notamment grâce à l'attraction de l'air humide et aux rivières volantes générées par les arbres de la forêt amazonienne qui déversent leur humidité sur toute la région, jusqu'en Bolivie, au Paraguay et jusqu'à Sao Paulo dans le sud du Brésil.

Ces masses d'eau aériennes représentent une clé pour comprendre pourquoi certaines régions agricoles dont le couvert forestier a été dévasté sont bien moins arrosées bien qu'elles soient situées à moins de mille kilomètres de

l'océan, quand des zones bien plus éloignées, mais dont les forêts ont été préservées sont plus humides et parviennent à obtenir des rendements agricoles bien plus élevés.

Il y a 6000 ans, lorsque le Sahara était luxuriant, les vents soufflaient de l'océan vers l'intérieur des terres.

Avec la désertification du continent, vraisemblablement d'origine humaine, la direction des vents s'est inversée.

Une question mérite donc d'être posée : un design global intelligent à l'échelle d'une région, d'un pays ou d'un continent consistant à étendre ou recréer des forêts de feuillus d'essences locales régulièrement espacées permettrait-il de restaurer les conditions d'une meilleure pluviométrie dans des zones devenues arides ?

Cette régulation serait non seulement plus importante dans les zones les plus chaudes actuellement arides, mais aussi plus efficace, car une des lois de la thermodynamique énonce que la quantité d'eau contenue dans un gaz est corrélée à sa température.

Ainsi plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'humidité, mais il faut des forêts pour que cette humidité se transforme en précipitations.



Des peintures rupestres de poissons au cœur du Sahara témoignent de l'ancienne présence d'eaux de surface dans ce qui est devenu un désert



Victor Gorshkov et Anastassia Makarieva, Antonio Nobre, Françis Hallé



RÉÉVALUER LE RÔLE DES PLANTES DANS LA COMPRÉHENSION DES CYCLES DE L'EAU

L'intuition de l'influence des arbres sur le régime des pluies et des liens entre perturbations du cycle de l'eau, perte des sols et de leur fertilité et déboisements est ancienne.

C'est du moins ce que suggère l'extrait suivant du dialogue rédigé il y quelque 2500 ans par Platon, qui déplore la dégradation des paysages de l'Attique.

« L'Attique d'aujourd'hui ne peut plus être décrite que comme une relique de la terre originelle.

La qualité du y sol était sans égale, en sorte que le pays pouvait nourrir une nombreuse armée exempte des travaux de la terre […] en ce temps-là, à la qualité de ses produits se joignait une prodigieuse abondance. […]

Depuis ce temps-là, le sol qui s'écoule des hauteurs en ces temps de désastre ne dépose pas, comme dans les autres pays, de sédiment notable et, s'écoulant toujours sur le pourtour du pays, disparaît dans la profondeur des flots. Aussi comme il est arrivé dans les petites îles, ce qui reste à présent, comparé à ce qui existait alors, ressemble à un corps décharné par la maladie.

Tout ce qu'il y avait de terre grasse et molle s'est écoulé et il ne reste plus que la carcasse nue du pays.

Mais, en ce temps-là, le pays encore intact avait, au lieu de montagnes, de hautes collines ; les plaines qui portent aujourd'hui le nom de Phelleus étaient remplies de terre grasse ; il y avait sur les montagnes de grandes forêts, dont il reste encore aujourd'hui des témoignages visibles.

Si, en effet, parmi les montagnes, il en est qui ne nourrissent plus que des abeilles, il n'y a pas bien longtemps qu'on y coupait des arbres propres à couvrir les plus vastes constructions, dont les poutres existent encore.

Il y avait aussi beaucoup de grands arbres à fruits et le sol produisait du fourrage à l'infini pour le bétail.

Il recueillait aussi les pluies annuelles de Zeus et ne perdait pas comme aujourd'hui l'eau qui s'écoule de la terre dénudée dans la mer, et, comme la terre était alors épaisse et recevait l'eau dans son sein et la tenait en réserve dans l'argile imperméable, elle laissait échapper dans les creux l'eau des hauteurs qu'elle avait absorbée et alimentait en tous lieux d'abondantes sources et de grosses rivières.

Les sanctuaires qui subsistent encore aujourd'hui près des sources qui existaient autrefois portent témoignage de ce que j'avance à présent.

Telle était la condition naturelle du pays.
Il avait été mis en culture, comme on pouvait s'y attendre, par de vrais laboureurs, uniquement occupés à leur métier, amis du beau et doués d'un heureux naturel, disposant d'une terre excellente et d'une eau très abondante, et favorisés dans leur culture du sol par des saisons le plus heureusement tempérées.»

– Platon Critias (VIe siècle avant l'ère chrétienne)

L'extrait de ce dialogue montre que l'on établissait, déjà il y a 2500 ans un lien entre perturbations du cycle de l'eau, perte des sols et de leur fertilité et déboisement des sommets et des pentes des montagnes de l'Attique.

Cette intuition ne semble malheureusement pas avoir guidé la pratique des humains autour de la méditerranée.

Il ne nous reste que des écrits antiques, des lambeaux forestiers secondaires, et des données palynologiques pour imaginer ce que furent les forêts de cèdres majestueuses du Liban et les forêts denses d'Espagne par exemple.



Site archéologique de Troizen, en Grèce
(Photographie Robin Iversen Rönnlund)



Forêts sclérophylles et mixtes de la mer Égée
(Dimitris Vetsikas)



Paysage actuel de l'île de Madère
où les forêts ont disparu

L'HYPOTHÈSE DE CHRISTOPHE COLOMB

L'influence majeure du couvert forestier sur le régime des pluies a été l'objet d'un regain de réflexion au XVe siècle. Comme en témoignent les observations sur le changement de climat qui affecta à l'époque l'archipel de Madère.

Inhabitée avant l'arrivée des Portugais en 1419, les îles de Madère et de Porto-Santo connurent en quelques décennies des changements environnementaux brutaux. Les colons portugais commencèrent par déboiser une partie de l'archipel pour y cultiver de la canne à sucre qui devint le premier centre mondial de production de sucre.
Dans les années 1450, capitaux européens et esclaves africains convergèrent vers Madère pour en faire la première économie de plantation de l'histoire. Or la production de sucre est très énergivore. Vers 1510, l'île qui avait été baptisée « *Madera* », l'île « *du bois* », s'était déjà vue déboisée sur un tiers de sa surface, en particulier le long des côtes.

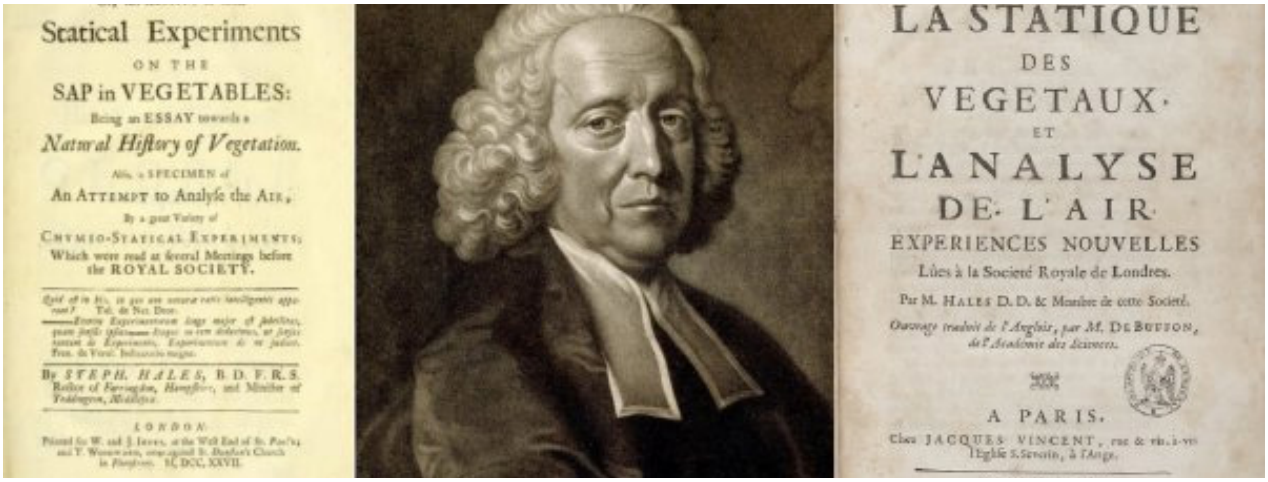
Faute de bois pour alimenter les raffineries et aussi du fait de l'appauvrissement des sols, la production sucrière s'effondra.

Christophe Colomb fut le témoin du « *choc écologique* » qui bouleversa le climat et la flore de cet archipel. Il constata que la destruction du couvert forestier de Madère avait entraîné un changement du régime des pluies sur l'île. Initialement marqué par des pluies abondantes et régulières, le climat de l'île était en très peu de temps devenu de type méditerranéen avec de longs étés très secs et la végétation autrefois forestière devint de type garrigue et maquis.

De ses voyages et expériences, nous apprend l'historien Jean-Baptiste Fressoz, Christophe Colomb aurait tiré l'hypothèse aujourd'hui qui, comme nous venons de le voir, est de plus en plus étayée selon laquelle les arbres sont générateurs de pluie :

> *« En juillet 1494, lors de son second voyage, la flotte de Christophe Colomb navigue entre Cuba et la Jamaïque sous les pluies diluviennes de la mousson.*
>
> *L'expédition est en péril : des trombes submergent les cales, corrompant les provisions et la chaleur étouffante rend la conservation des aliments impossible. Plusieurs jours durant, le ravitaillement de l'équipage dépend du seul secours des Indiens.*
>
> *Dans cette situation critique, Christophe Colomb aurait eu la réflexion suivante : "le ciel, la disposition de l'air et du temps à ces endroits sont les mêmes que dans les environs" à savoir que "chaque jour, à l'heure des vêpres, apparaît un nuage avec de la pluie qui dure une heure, quelquefois plus, quelquefois moins", ce qu'il attribuait aux grands arbres de ce pays.*
>
> *La preuve que Colomb apporte du lien entre couvert forestier et précipitations est la suivante : il savait "par expérience" qu'il en avait été de même auparavant "aux Canaries, à Madère et aux Açores", mais que depuis que l'on y avait coupé les arbres "qui les encombraient il ne se génère plus autant de nuages et de pluie qu'avant." »*

PREMIERS DÉBATS SUR LE RÔLE DE LA DÉFORESTATION DANS LA PERTURBATION DU CYCLE DE L'EAU ET LE RISQUE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE GLOBAL



Stephen Hales

Le lien entre évapotranspiration des plantes et précipitations sera expérimentalement établi au XVIIIe siècle par des botanistes britanniques comme John Woodward, auteur de *Some Thoughts and Experiments Concerning Vegetation* édité en 1699, et surtout Stephen Hales dont l'ouvrage *Vegetable Staticks* publié en 1727 fut considéré par Buffon comme fondamental pour l'étude de la physiologie végétale et du phénomène de l'évapotranspiration.

Le célèbre naturaliste français s'empressa de traduire l'œuvre majeure de Stephen Hales qui fut publiée à Paris en 1735.

L'étude de la physiologie des plantes ayant permis de saisir le rôle des plantes dans le cycle de l'eau, les savants de cette période marquée par l'invention du thermomètre et la mise au point des méthodes modernes d'observations météorologiques, vont globaliser leur réflexion climatique, à partir de l'hypothèse que le fonctionnement du cycle de l'eau se joue à l'échelle planétaire.

Dans l'ouvrage *Les révoltes du ciel, une histoire du changement climatique XVe — XXe siècle*, les historiens Jean-Baptiste Fressoz et Fabien Locher rapportent que :

> *« Dès la fin du XVIIIe siècle, on utilise les relevés thermométriques pour renseigner l'évolution du climat. La qualité des savoirs produits à cette époque est saisissante : les savants étudient le gel des fleuves, l'étagement de la végétation, l'évolution des glaciers…*
>
> *Mais cette sophistication du débat ne devrait pas nous surprendre, car il ne faut pas oublier qu'il s'agit de sociétés agraires à la fois très vulnérables aux intempéries et dont l'essentiel des richesses dépend du sol et du ciel. »*

Une fois établie la certitude que les forêts jouent un rôle important dans le cycle de l'eau via le phénomène de transpiration, l'idée qu'elles seraient garantes des pluies et donc de la production agricole est devenue un objet de débat public, car les forêts avaient à l'époque une immense importance, stratégique, économique et financière.

La question du lien entre déboisement et changement climatique devient une controverse publique à la fin du XVIIIe siècle et la France va jouer un rôle pivot dans sa diffusion globale pour une raison conjoncturelle.

Après la nationalisation des biens du clergé en 1789 pour solder les dettes de la monarchie, l'État français s'est trouvé à la tête d'un immense domaine forestier.

Chaque fois qu'il fut question de vendre un bout de forêt nationale pour renflouer le trésor public, la polémique sur les conséquences climatiques d'une telle décision s'enflamma.

C'est ainsi qu'à partir de 1792, l'Assemblée nationale, fut un lieu récurent de débats sur le déboisement, le changement climatique, l'érosion des sols et les risques d'inondations.

À la différence du débat actuel sur le changement climatique global, l'enjeu était alors le cycle de l'eau et pas celui du carbone. Dès la fin du XVIIIe siècle, des scientifiques pensent que le déboisement peut avoir des conséquences irréversibles, car en faisant disparaître les forêts, on produit un changement climatique qui va rendre impossible la croissance ultérieure des forêts.

Pendant tout le XIXe siècle, les débats vont faire rage entre savants à propos de la possible action humaine sur le climat, mais faute de preuves irréfutables, aucune conclusion nette ne pourra se dessiner.

On peut toutefois affirmer que ces débats se sont soldés par une minimisation de l'impact de la déforestation sur le climat, car la climatologie qui s'élabore, à la fin du XIXe siècle postule la fixité du climat à l'échelle des temps historiques.

Pour l'opinion scientifique dominante, le climat change, mais à des rythmes si lents que l'histoire humaine et l'histoire climatique sont considérées comme déconnectées.

Les voix des Cassandre qui affirmaient le contraire devinrent inaudibles dans un contexte où le spectre des disettes refluait après la mise au point des premiers engrais chimiques.

La menace d'un changement climatique causé par les humains s'éclipsa peu à peu des consciences entre la fin du XIXe et le milieu du siècle suivant.

Mais ce ne fut qu'un bref interlude. Dès les années cinquante, une nouvelle génération de scientifiques va de nouveau attirer l'attention sur l'origine anthropique d'un possible changement climatique.

Mais, cette fois-ci, ce n'est pas la perturbation du cycle de l'eau qui est mise en cause, mais celle du cycle du carbone, imputée essentiellement à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone.

Entre-temps, un chercheur singulier aura renouvelé l'approche des cycles de l'eau et démontré l'impact délétère de la destruction des couverts forestiers.

Il s'agit de Viktor Schauberger dont nous allons présenter une partie des travaux dans la partie suivante.

ALTÉRATIONS DES CYCLES HYDROLOGIQUES PAR LES HUMAINS

Garde forestier, naturaliste, ingénieur et philosophe autrichien, Viktor Schauberger a produit une œuvre dans laquelle l'étude de l'eau tient une place majeure.

C'est en arpentant les forêts primaires des montagnes autrichiennes avant qu'elles ne disparaissent que le jeune Viktor a entamé une réflexion qu'il poursuivra toute sa vie sur les propriétés et les fonctions de l'eau vive en observant avec attention le cours turbulent des rivières de montagnes et la vie qu'elles abritent.

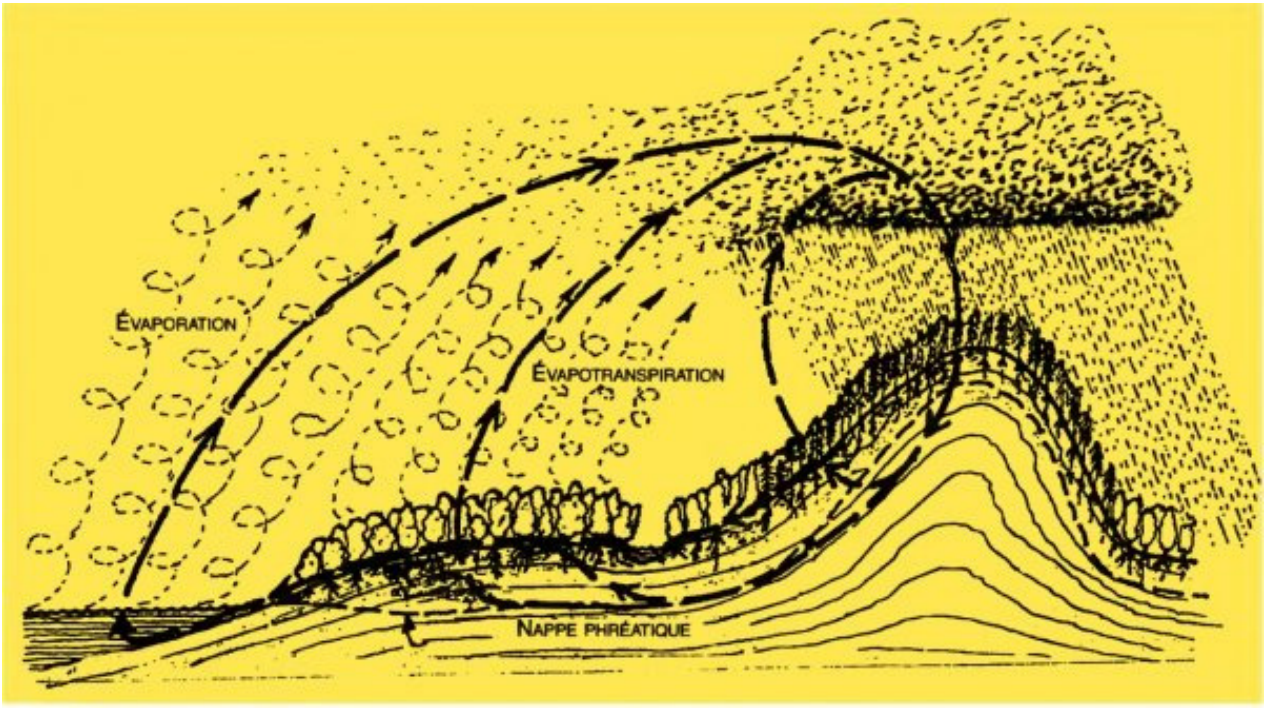
Pour Viktor Schauberger, l'eau est pour la terre ce que le sang est pour l'organisme.

Si son cycle se déséquilibre de quelque manière que ce soit, les conséquences sont désastreuses : sécheresses, inondations, vents et incendies incontrôlables, eutrophisation, désertification…

Viktor Schauberger a théorisé la perturbation du cycle de l'eau en distinguant ce qu'il appelle le « *cycle complet de l'eau* » du « *demi-cycle* » généré par les interventions délétères des humains sur le milieu naturel.

Les deux schémas suivants illustrent et synthétisent cette distinction.

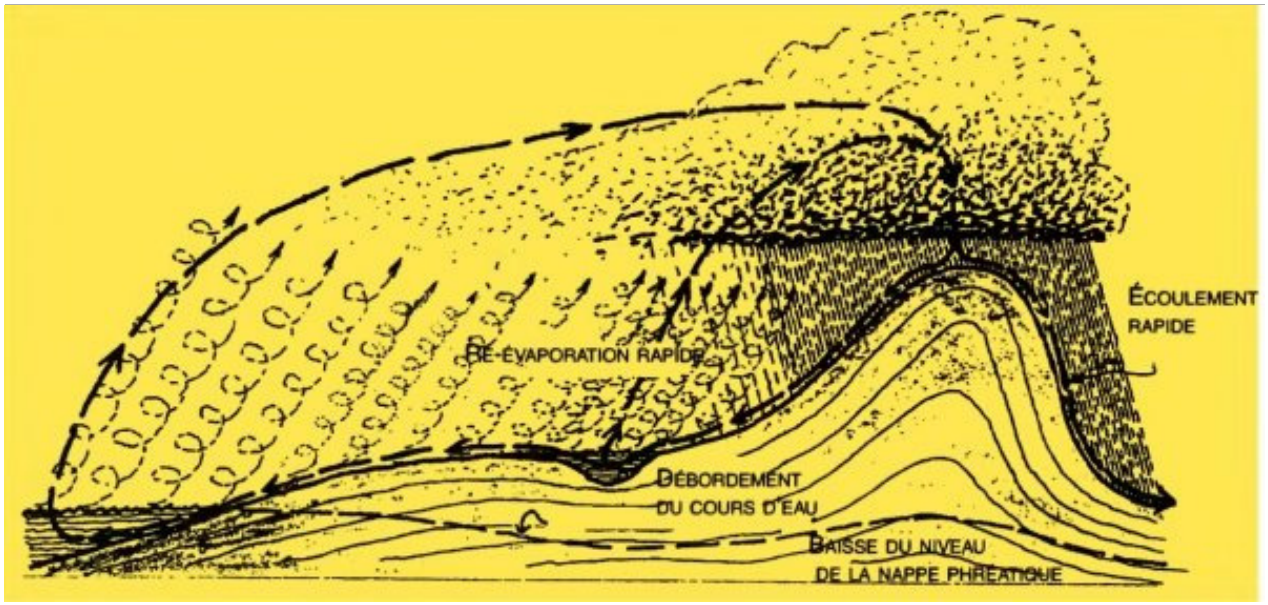
CYCLE ET DEMI-CYCLE DE L'EAU SELON VIKTOR SCHAUBERGER



Cycle de l'eau complet

Les spirales ascendantes tournant en sens contraire des aiguilles d'une montre correspondent à l'évaporation de l'eau de mer, qui s'élève, se condense et tombe sous forme de pluie.

Les spirales ascendantes tournant dans le sens des aiguilles d'une montre correspondent à l'évapotranspiration du couvert végétal.



Demi-cycle de l'eau

CONDITIONS D'UN CYCLE COMPLET DE L'EAU

Pour Viktor Schauberger, la présence d'un couvert forestier est indispensable à l'accomplissement complet du cycle de l'eau.

Non seulement l'évapotranspiration par les plantes et le sol augmente le volume de vapeur d'eau dans l'atmosphère, mais le couvert végétal facilite la pénétration des précipitations, en faisant du sol une éponge, en freinant et en étalant les eaux de ruissellement.

Plus important encore pour le forestier autrichien, la présence de forêts et d'autres formes de couverture végétale, crée un gradient de température positif.

Cette expression « gradient de température » exprime la variance progressive de la température avec la distance, la direction et le rythme auxquels la température change le plus rapidement autour d'un endroit et d'un milieu particulier.

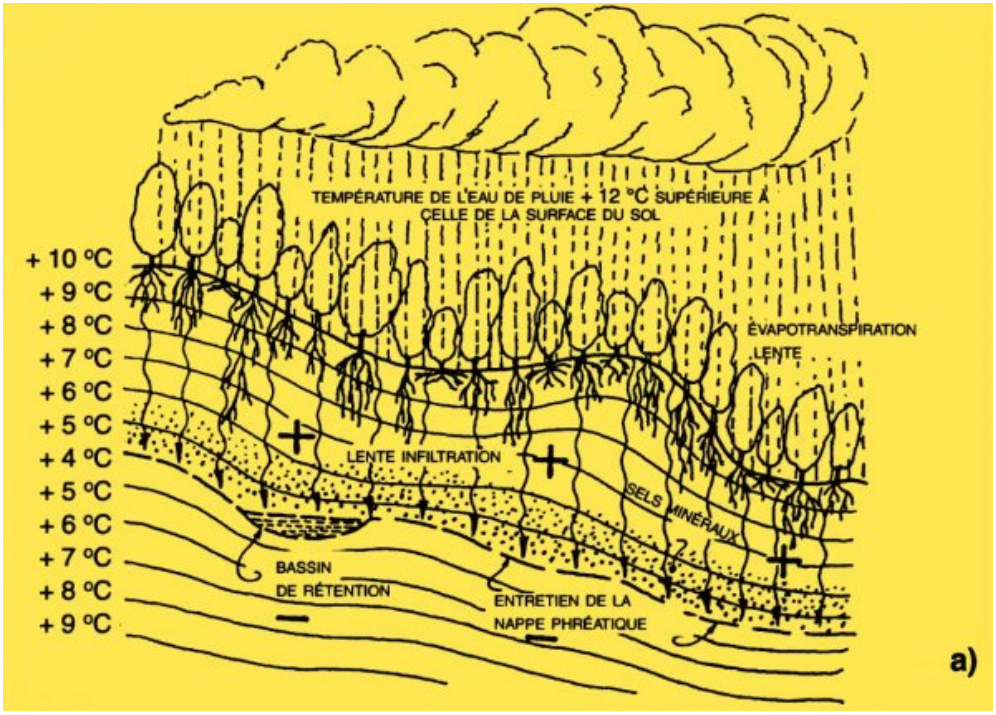
Le caractère positif ou négatif du gradient de température indique le sens dans lequel s'opère le mouvement, le déplacement s'effectuant toujours du chaud vers le froid.

Un sol ombragé par des arbres est plus froid que l'eau de pluie. Cette différence permet à la surface du sol d'être aisément détrempée. Une partie importante des précipitations s'enfonce en terre, tandis que l'autre s'écoule à sa surface.

Dans les zones où règne habituellement un gradient de température positif, environ 85 % des précipitations sont retenues, dont 15 % par la végétation et l'humus, et environ 70 % descendent dans les nappes aquifères souterraines, qu'elles rechargent.

Pour Viktor Schauberger, cette recharge des nappes est importante parce que le réseau hydrique souterrain capte la charge énergétique négative de la Terre. Dans une forêt naturelle, les arbres adultes, grâce à leurs racines profondes, font remonter l'eau souterraine ainsi que les minéraux et oligo-éléments.

Viktor Schauberger considère que les arbres agissent comme des biocondensateurs équilibrant l'énergie positive du soleil et celle négative de la terre. En conséquence, l'évapotranspiration de leurs feuilles est une énergie créatrice équilibrée.



a) Gradient de température positif

Viktor Schauberger a par ailleurs avancé que lorsque la lumière et l'air sont absents bien en deçà de la surface, minéraux et sels précipitent à une température avoisinant + 4 °C.

Si, en surface, la couverture forestière satisfaisante assure une fraîcheur du sol, les sels dissous restent à un niveau où ils ne polluent pas les strates supérieures, évitant ainsi de nuire aux plantes qui y sont sensibles.

La nappe phréatique adopte une configuration analogue à celle de la surface du sol.

Enfin, comme dit plus haut, le déplacement de l'énergie ou des nutriments s'effectuant du chaud vers le froid, un gradient de température positif permet que les nutriments montent vers les racines des plantes.

CONDITIONS D'UN DEMI-CYCLE DE L'EAU

En l'absence de couverture arborée, le cycle hydrologique est altéré. L'évapotranspiration est réduite. Les sols nus des paysages agricoles et le béton ou l'asphalte des paysages urbains induisent une ré-évaporation rapide des précipitations. Sans couverts végétaux et sans vie tenant et structurant les sols, ceux-ci sont emportés par ruissellement.

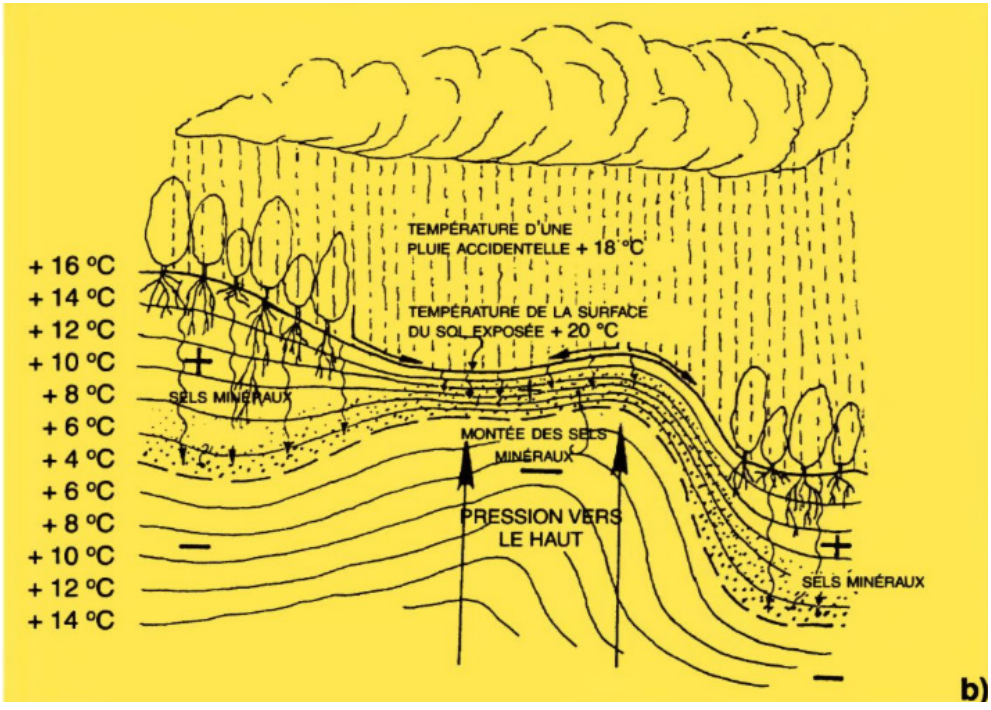
En général, soit des pluies torrentielles éclatent, soit la saison des pluies est immédiatement interrompue. Sans l'effet tampon des arbres et autres végétaux pérennes amortissant et retenant les précipitations, les rivières débordent, les sols s'érodent et les paysages se déshydratent.

Si la surface du sol n'est pas protégée, elle s'échauffe et l'eau de pluie est plus froide que le sol. Ce gradient de température négatif rend la pénétration de l'eau de pluie plus difficile.

Il exerce sur la nappe phréatique une pression dirigée vers le haut entraînant les sels dissous, qui restent près de la surface et peuvent induire des problèmes de salinisation excessive
La chaleur du sol favorise également l'évaporation de l'humidité à proximité de la surface, si bien que les sels minéraux s'y déposent, diminuant ainsi sa fertilité.

Si tous les arbres sont abattus, l'eau de pluie ne pénètre pas ; au début, la nappe phréatique monte, car la pression s'exerçant vers le haut n'est plus compensée entraînant avec elle tous les sels dissous, mais finalement elle gagne les profondeurs ou disparaît sans être reconstituée par l'eau de pluie.

On ne peut rendre au sol, et à temps, sa fertilité qu'en replantant des arbres destinés à rétablir un gradient de température positif.



b) Gradient de température négatif

PHASES DES CYCLES HYDROLOGIQUES SELON VIKTOR SCHAUBERGER

Cycle complet

- *Évaporation venant des océans*
- *Évapotranspiration induite par la végétation et le sol*
- *Élévation de la vapeur d'eau*
- *Refroidissement et condensation de la vapeur d'eau*
- *Formation des nuages*
- *Précipitation sous forme de pluie*
- *Infiltration dans le sol due au gradient de température positif*
- *Reconstitution des nappes phréatiques et aquifères*
- *Entretien et régulation du niveau des nappes phréatiques*
- *Formation de la couche centrale de la nappe phréatique à + 4 °C*
- *Création de bassins de rétention (nappes phréatiques)*
- *Traversée de la couche centrale de la nappe phréatique à 4 «C*
- *Purification de l'eau à cette température ;*
- *Pénétration plus profonde des nappes aquifères souterraines par gravité*
- *Passage à l'état de vapeur dû à l'influence de la chaleur interne de la Terre ;*
- *Remontée vers la surface du sol avec captation de nutriments*
- *Refroidissement de l'eau avec dépôt de nutriments.*
- *Écoulement à la surface du sol*
- *Évaporation et formation des nuages*
- *Nouvelle précipitation*
- *… et ainsi de suite.*

Demi-cycle

- *Évaporation à la surface de la mer ;*
- *Élévation de la vapeur d'eau*
- *Refroidissement et condensation de la vapeur d'eau*
- *Formation des nuages*
- *Précipitations sous forme de pluie*
- *Faible pénétration en raison du gradient de température négatif*
- *Écoulement rapide à la surface du sol*
- *Pas de reconstitution de la nappe phréatique*
- *Disparition, à long terme, de la nappe phréatique*
- *L'alimentation naturelle des plantes en nutriments cesse*
- *Dans certaines conditions, une inondation majeure survient*
- *Ré-évaporation rapide et excessive*
- *Sursaturation de l'atmosphère par la vapeur d'eau*
- *Nouvelle précipitation sous forme de pluies orageuses.*

VOIES NÉGLIGÉES DES CYCLES DE L'EAU

Quand on pense au cycle de l'eau en agriculture, fait remarquer Hervé Coves, on pense essentiellement aux précipitations.

Ainsi, le cycle de l'eau figuré par le schéma présenté dans le premier chapitre qui fait quasiment consensus dans la communauté scientifique ne tient compte que de la pluviométrie.

Or l'eau récupérée dans les pluviomètres n'enregistre ni ne comptabilise le volume d'eau créée par d'autres voies comme celle de la condensation, de la photosynthèse ou d'autres processus à l'œuvre lors de la dégradation de la biomasse.

Nous verrons que les volumes d'eau qui passent sous les radars des outils conventionnels de la « comptabilité » de l'eau sont loin d'être négligeables.

Ajoutées à celle de l'évapotranspiration, ces voies négligées des cycles hydrologiques permettent d'imaginer la possibilité pour les humains de cultiver l'eau en s'inspirant des processus naturels de formation de l'eau et des précipitations par les plantes et des modalités de stockage naturel de l'eau dans les sols vivants.

VOIE DE LA CONDENSATION



Un cycle de l'eau peu étudié jusque-là est celui qui est lié à la condensation. C'est dommageable, car ce cycle semble extrêmement efficace.

La condensation est le changement de l'eau de l'état gazeux à l'état liquide lié à des différences de température.

Le volume d'eau créée par la condensation n'est pas négligeable. Partout où il y a des différences de température dans un écosystème, l'eau peut se condenser. Par forte chaleur, l'eau se condense aux endroits où il fait un peu plus frais.

Dans les forêts, les zones d'ombre les plus fraîches vont être des noyaux de condensation. Au niveau du sol, la condensation se matérialise par la rosée.

La rosée, à laquelle s'abreuvent de nombreux insectes tels que les coccinelles, les abeilles, fournit un apport hydrique insoupçonné aux végétaux qui l'absorbent par les feuilles et d'autres organes aériens ou par les racines de surface à partir de la terre qui a capté la rosée.

Pour Ernst Zürcher, les propriétés de cette eau particulière mériteraient d'être mieux étudiées.





Il y a deux formes de rosée, rappelle Hervé Coves : celle du matin et celle du soir. La rosée du soir va se former au moment où l'air est très chaud et où énormément d'eau s'est évaporée ; l'air est donc fortement chargé en humidité.

On appelle « point de rosée » le moment où l'eau contenue dans l'air va se condenser quand la température du sol et des plantes est plus froide.

Tout comme lorsqu'on prend une douche chaude de la buée se forme sur les vitres des fenêtres qui sont des surfaces froides, dans un écosystème naturel, la condensation va se faire sur les zones les plus froides qui sont souvent les feuilles épaisses des arbres de sous-bois.

Ces feuilles ont la capacité d'absorber de grandes quantités d'eau — de deux à quatre millimètres d'eau par jour, soit environ trente millimètres en dix jours, autrement dit l'équivalent d'un gros orage.

Comme cette eau se condense la nuit, il n'y a pas d'évapotranspiration, l'eau redescend par le réseau de sève élaborée, arrive au réseau racinaire et peut se redistribuer à d'autres plantes par la réhydratation du sol via le réseau mycorhizien, c'est-à-dire le réseau résultant de l'association symbiotique entre des champignons et les racines des plantes.

Lorsqu'un tel réseau interconnecte les plantes, plus il fait chaud, plus ce système fonctionne et les manques d'eau dans un système vivant peuvent se gérer directement par les plantes.

La quantité d'eau qui peut être ainsi mise à disposition des plantes correspondrait à la moitié de leurs besoins, selon Hervé Coves.

Anastassia M. Makarieva et Victor G. Gorshkov, créateurs du concept de « *pompe biotique* », affirment même que l'essentiel de l'eau que les plantes reçoivent résulte de la condensation.

Dans un agroécosystème qui veut tirer parti de la condensation, il sera donc important de créer un design maximisant les zones de condensation.

Lorsque nous présenterons quelques initiatives de régénération de milieux arides et dégradés, nous verrons que c'est ce qu'a réussi Geoff Lawton dans le désert de Jordanie.

LA FORÊT NATURELLE S'ARCHITECTURE POUR MAXIMISER LA CONDENSATION

« *La vie autoentretient l'humidité, pour peu qu'on la laisse s'architecturer en trois dimensions* », explique également Hervé Coves. On peut donc « *cultiver l'eau si on favorise des cultures de hauteurs différentes.* »

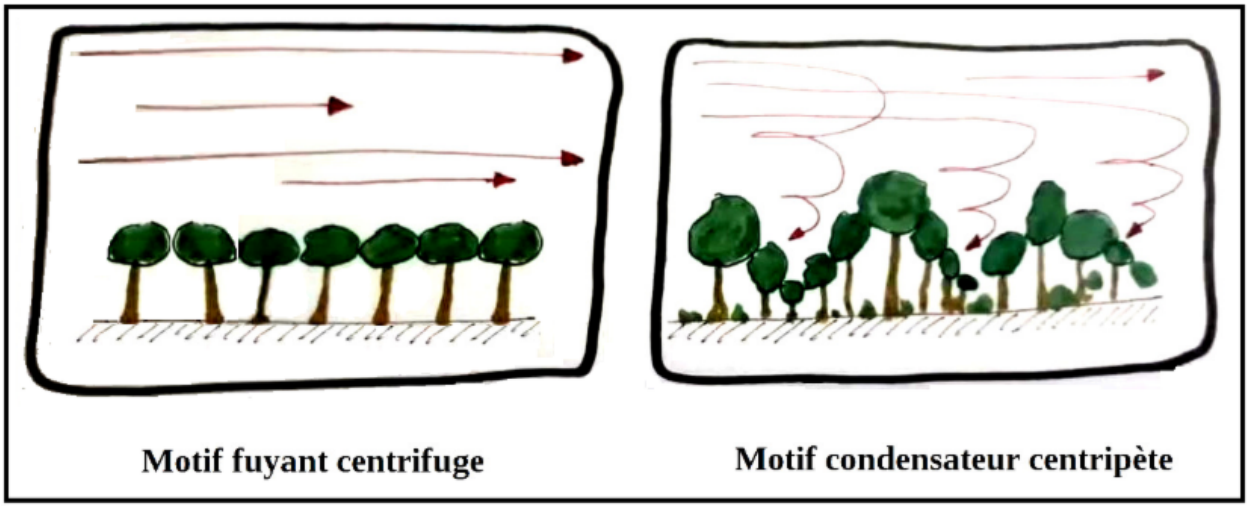
L'eau peut ainsi être une production inhérente à chaque système de culture.

Quand on a une canopée très homogène, l'air circule au-dessus de manière régulière et parallèle et toute l'humidité s'évacue.

En revanche, dès que le paysage est irrégulier, l'hétérogénéité crée des petites dépressions ; de l'air un petit peu plus chaud arrive à un endroit un peu plus froid, et chaque petite zone de dépression va agir comme un condensateur d'eau.

Dans les plantes dont les feuilles absorbent l'eau de condensation, cette eau descend dans les racines, y dilue la sève élaborée et ces plantes vont exsuder de l'eau par leurs racines (on parle d'exsudats racinaires).

Si les zones de dépression sont multipliées, les volumes d'eau captés deviennent si importants que l'eau exsudée par les racines doit ressortir et les sources reviennent.



Dans un paysage hétérogène avec une couverture dense quand le soleil tape d'un côté l'autre côté est plus froid. La couverture végétale du sol qui est dense est beaucoup plus froide que la strate végétale de la canopée.

Cette différence de température va permettre de condenser l'humidité et de la répartir.

Avec des systèmes végétaux de hauteurs hétérogènes, 50 % de l'eau évaporée peut être recyclée sur place.

Avec ce recyclage, là où il est tombé 100 mm d'eau, c'est comme s'il était tombé 200 mm d'eau.



LES FORÊTS NATURELLES QUI FAVORISENT L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DU RELIEF DE LA CANOPÉE MAXIMISENT LA CONDENSATION



CHEMINS CREUX ET CONDENSATION

En Europe, les chemins creux sont des sentiers situés entre deux talus en général bordés de haies d'arbres formant des couverts.

Les chemins creux qui étaient les voies traditionnelles de circulation dans les paysages de bocage reliaient les parcelles agricoles aux villages et aux fermes.

Ce design en creux du réseau de chemin des bocages résulte de l'élévation, par les paysans, de deux talus sur les côtés, enrichis par le substrat d'un éventuel fossé longeant le chemin afin de l'assainir.

Il est aussi lié au fait qu'à l'automne, les paysans clôturaient les chemins et y faisaient paître vaches, porcs ou moutons.

À la fin de l'hiver, ils ramassaient le mélange de feuilles mortes et d'excréments et le répandaient dans les champs pour en amender la terre, par manque de paille.

En prélevant à chaque fois un peu de terre, les chemins s'enfonçaient progressivement et le ruissellement dans ces chemins qui descendaient souvent vers un ruisseau accentuait le phénomène.

Ombragés par de la végétation, les chemins creux agissent comme des structures de condensation.

L'humidité captée par la végétation bordant les chemins est redistribuée dans le système racinaire et dans la végétation alentour par les mycorhizes.

Par ailleurs, la structure en tunnel de ces chemins va évacuer un air frais et humide vers les fonds de la vallée et créer une dynamique microclimatique à l'échelle d'un paysage.

PLANTES CONDENSATRICES



Lierre grimpant

Certaines plantes condensent plus particulièrement la rosée. C'est le cas de nombreuses lianes, de la vigne ou du houblon dans une moindre mesure.

Mais parmi les plantes «*condensatrices*», le lierre grimpant (*Hedera helix*) est la plus efficiente car ses feuilles sont particulièrement froides.

Du fait de cette particularité, c'est sur le lierre que va se condenser l'eau, tout comme la buée se met uniquement sur la vitre qui est le point le plus froid de la pièce.

C'est ainsi, explique Hervé Covès que dans les arbres, les forêts, les lisières, les haies agroforestières, quand il y a un lierre, c'est sur le lierre que la rosée va se poser, plus particulièrement sur la face inférieure des feuilles.

«Lorsqu'il fait très chaud, si vous mettez votre main dans un lierre près d'un arbre au moment de la tombée de la nuit et votre main va devenir moite simplement en étant derrière le lierre.

Le lierre va absorber cette eau par la face inférieure de ses feuilles qui est la partie la plus froide, et comme il ne transpire pas du fait de la fraîcheur de la nuit, cette eau va redescendre dans sa sève élaborée jusqu'aux racines.

Elle va se diffuser dans les champignons, ce fameux réseau d'hyperfluidité mycorhizien, auquel elles sont associées, et elle va être redistribuée aux plantes qui sont autour.

Cette rosée du soir qui va durer entre deux et cinq heures va permettre de récupérer entre deux et quatre litres d'eau par mètre carré et de réhydrater le sol. Et plus il fait chaud, plus ça marche.

Dans les mesures qu'on a réalisées pendant la canicule de l'an dernier, sur ces lieux de condensation pendant dix jours de la canicule, 30 millimètres d'eau se sont condensés par le biais de lierre et de quelques autres plantes. Trente millimètres d'eau, c'est l'équivalent d'un orage.

Alors que partout ailleurs c'était sec, on a capté, là où il y avait des lierres, l'équivalent de la pluie d'un orage.

Maintenant autour de la maison, j'ai installé ou je suis en train d'installer ces fameux condensateurs sur des trognes. Il suffit de faire pousser un lierre autour et ça marche.

Autour de ces zones-là, le sol est humidifié sur un rayon qui est de l'ordre de deux fois et demie la hauteur de la structure en temps ordinaire. Quand il fait très chaud le rayon n'est plus que d'une fois à une fois et demie de cette hauteur.

Ainsi, si j'ai une structure de deux mètres de haut, par exemple, un tronc avec un lierre autour, une fois et demie ça fait une zone de presque quatre mètres autour de cette trogne où je n'ai plus besoin d'arroser quand il y a de la canicule.»

On voit ici, que le manque d'eau peut être géré directement par les plantes.

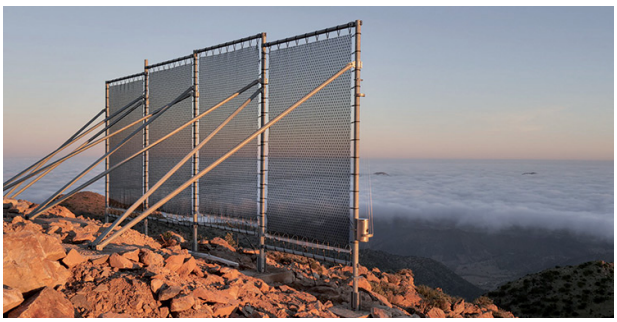
Non seulement les plantes vont permettre d'augmenter la réserve utile en eau des sols et de faire du sol une éponge qui retient un maximum d'eau, mais vont aussi permettre de générer de l'eau par le phénomène de la condensation et la présence de structure de condensation[1].

On est ainsi capable de condenser de l'eau grâce à des végétaux.

Dans la cordillère des Andes et dans d'autres régions du monde, on installe de grands filets qui vont capter les nuages, mais un tel captage se fait naturellement sur n'importe quelle plante à feuillage un peu épais, vernissé et froid comme le lierre et d'autres plantes de sous-bois.

Cette propriété de recueillir l'eau des brumes, brouillards et autres formations nuageuses est une connaissance ancienne.

Certains arbres ont ainsi été appelés «*arbres fontaines*».



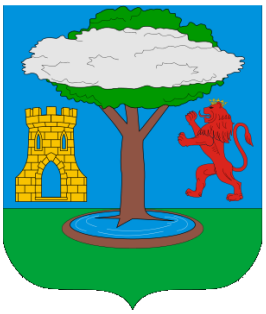
Attrape brouillard au Chili

1 La réserve utile en eau d'un sol est la quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer aux plantes.



Olivier devenu arbre fontaine à Santiago du Chili

LES ARBRES FONTAINES



Sur les armoiries de l'île de Hierro de l'archipel des Canaries, figure un arbre appelé garoé (*Ocotea foetens*) dont le nom signifie « *rivière* » ou « *lagune* » en langue amaziq.

Cette espèce de laurier endémique a été surnommée « *arbre fontaine* » ou « *arbre saint* » par le célèbre missionnaire espagnol Bartolomé de Las Casas après avoir vu que les autochtones Guanches récupéraient à son pied l'eau des brumes et du brouillard.

Sur la base des témoignages disponibles à l'époque, l'humaniste néerlandais Olfert Dapper écrit à propos du garoé dans sa *Description de l'Afrique*, publiée en 1668, les lignes suivantes :

> *« Les nuages qui en couvrent la cime, excepté pendant les fortes chaleurs du jour, y répandent une rosée si abondante qu'on en voit continuellement couler de l'eau, et qu'il en tombe chaque jour vingt tonneaux dans des citernes de pierre, profondes de seize pieds et larges de vingt. »*

En fait, poussés par les alizés, les brouillards qui abondent sur cette île où les précipitations sont rares précipitent sur le feuillage des garoés, et cette eau de condensation qui ruisselle jusqu'à la base du tronc peut être recueillie.

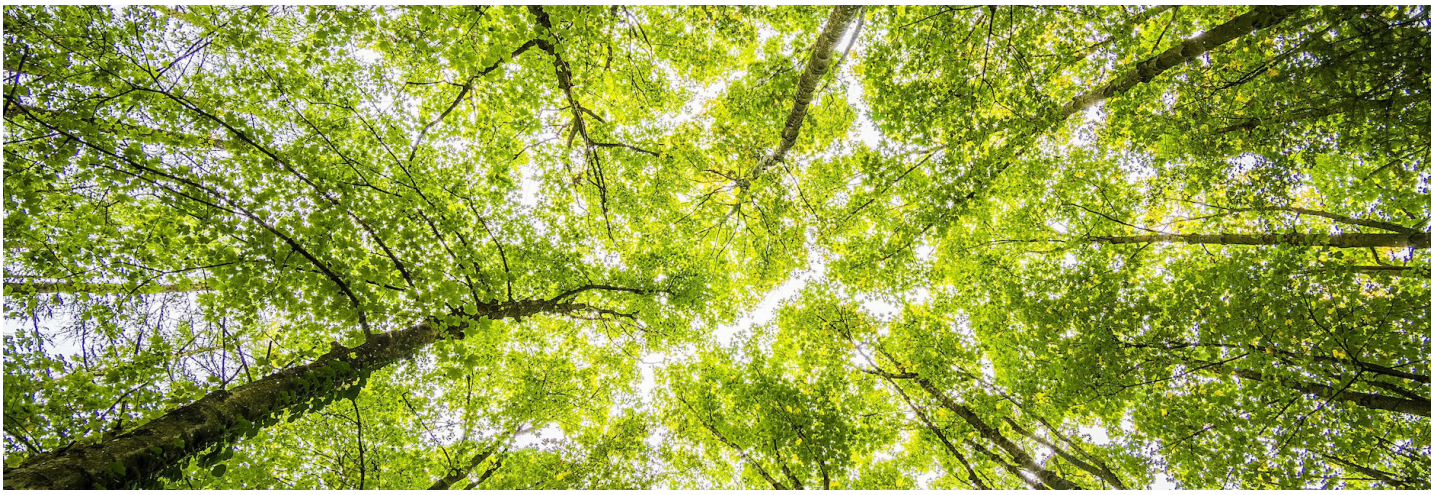
Le garoé n'est pas le seul « *arbre fontaine* », aux îles du Cap Vert, les arbres capteurs de brouillard sont des fourcroyas ou sisal blanc (*Agave fourcroydes*), qui fournissent jusqu'à 20 litres d'eau par jour.

À Oman, les arbres fontaines sont des oliviers dont la production quotidienne atteint 60 litres par arbre.

Le genévrier de mer (*Jupinerus canariensis*), le Laurier des Canaries (*Laurus azorica*), la Bruyère arborescente (*Erica arborea*) et d'autres arbres encore peuvent être des arbres fontaines.

Si certaines espèces favorisent la bonne capture de l'eau du brouillard, celle-ci dépend aussi beaucoup de la localisation des arbres.

Les cols des chaînes côtières face à la mer qu'ils dominent, tel un balcon, sont les meilleurs sites.



VOIE DE LA PHOTOSYNTHÈSE

Le mot «*photosynthèse*» est un terme scientifique formé à partir de trois racines grecques : *phos*, la lumière, *syn*, ensemble et *tithenai*, assembler.

Sur les bancs de l'école, en ouvrant un dictionnaire ou en consultant l'encyclopédie collaborative *Wikipédia* on apprend, à travers des formulations voisines, que la photosynthèse est le processus par lequel les plantes vertes synthétisent des matières organiques grâce à l'énergie lumineuse, en absorbant le gaz carbonique de l'air et en rejetant l'oxygène.

Ce faisant, les végétaux et aussi les bactéries photosynthétiques ont cette capacité remarquable de fabriquer de l'énergie et produire les composants qui les constituent à partir de quelques particules de la lumière solaire.

On dit qu'ils sont autotrophes, c'est-à-dire capables d'élaborer de manière autonome leur propre substance à partir de matières inorganiques.

Ce phénomène s'accompagne de l'absorption de dioxyde de carbone (CO_2) et de production d'oxygène (O_2).

> *«Ce qui est moins connu, nous dit Ernst Zürcher, c'est que lors de la photosynthèse la feuille émet non seulement des électrons, mais aussi des protons qui se recombinent en partie avec de l'oxygène et créent de l'eau. Le végétal produit ainsi une eau qui n'est pas issue des précipitations, une eau qui n'existait pas auparavant.»*

Ernst Zürcher décrit ainsi le mécanisme de génération de cette eau nouvelle :

> *«Ce qu'on dit en général de la photosynthèse est simplifié à l'extrême! Certes, le processus, en absorbant du dioxyde de carbone, produit bien du glucose et de l'oxygène, d'où l'importance des forêts contre l'effet de serre. Mais il y a bien plus. La photosynthèse aboutit aussi à la création d'une eau nouvelle qui n'a jamais circulé, vierge, douce. Et cela se fait en quantité relativement importante, puisque cette eau nouvelle est au moins égale à la moitié de la biomasse créée!*
>
> *Le processus de génération d'eau nouvelle est complexe. Cette eau compose notamment la sève élaborée issue de la photosynthèse. S'y ajoute l'eau "métabolique", issue de certaines réactions chimiques dans les cellules vivantes et lors de la décomposition par les champignons. Ce fait est majeur et devrait être mieux étudié.*
>
> *On prend sûrement plus de risques écologiques qu'on ne le croit en abattant des forêts. Car outre l'absorption du dioxyde de carbone, on se prive de réalimenter le stock d'eau douce très restreint de notre planète.»*
>
> – *Ernst Zürcher, entretien avec Isabelle Saget «Les arbres ont beaucoup à nous apprendre sur l'invisible»*

La création de cette eau nouvelle n'est pas prise en compte dans la littérature consacrée aux cycles de l'eau alors qu'elle est importante du point de vue des volumes d'eau produits : la formation d'un demi-kilo d'eau nouvelle est le corollaire de la formation d'un kilo de biomasse.

L'hydrogène de cette eau nouvelle vient de l'eau préexistante qui est hydrolysée, mais son oxygène vient du dioxyde de carbone de l'atmosphère.

On est là en présence d'une association inédite et c'est bien une eau nouvelle qui va circuler pour la première fois qui en résulte.

Le processus de création de cette eau fait partie de la physiologie des plantes.

« Ainsi, la photosynthèse génère de la biomasse et de l'oxygène qu'on peut respirer, mais à l'intérieur de la plante reste stockée dans le tissu cellulaire et dans le cytoplasme des cellules de l'eau qui n'avait encore jamais existé.
C'est le point de naissance de l'eau.
L'eau est un être vivant, pourrait-on dire. »

Cette eau d'origine végétale est dotée de caractéristiques particulières :

« Tout d'abord elle est vierge, elle est nouvelle, elle n'a encore jamais circulé, et n'a jamais été polluée.
Deuxièmement, c'est de l'eau qui est issue d'un système organique et les dernières découvertes sur l'eau, tout ce que Gérald Pollack a déployé sur le quatrième état de l'eau, permettent vraiment la compréhension de l'eau de manière globale.

Dans les systèmes organiques, lorsque l'eau est en contact avec des membranes hydrophiles, elle acquiert de nouvelles propriétés, elle devient beaucoup plus visqueuse, plus compacte, mieux structurée macromoléculairement, plus capable d'absorber l'énergie. L'eau est alors une substance vraiment particulière entre le liquide et le solide. Ce type d'eau que l'on trouve dans les plantes a probablement des propriétés spécifiques pour le vivant. Lors de la dégradation des matières organiques végétales, les sols reçoivent de l'eau nouvelle issue de la dégradation de la matière organique qui est très différente de l'eau qui a été pompée et qui est passée par des tubes en métal.

Quelles sont les propriétés de ces eaux nouvelles, mais aussi de la rosée du point de vue énergétique ? Voilà un champ de recherche qui s'ouvre. Olivier Husson aujourd'hui, et avant lui, Louis-Claude Vincent et sa "bioélectronique", Marcel Violet et les choses fabuleuses qu'il a développées pour redynamiser l'eau ont ouvert de pistes de recherche. Tout ça travaille avec ces notions de pH et de potentiel redox.

Les plantes sont des systèmes photovoltaïques ; ce sont des systèmes, dont les piles électriques sont organiques.

Ces principes sont mis en œuvre dans les systèmes agroforestiers, puisque les arbres sont la composante du système qui amène une intensité d'énergie particulière. »

– Ernst Zürcher, intervention lors « Rencontres de l'Agroécologie du bassin méditerranéen »

NOTE SUR LA PHOTOSYNTHÈSE

Dans les manuels scolaires, les ouvrages et les sites web de vulgarisation scientifique, on trouve généralement la formule de la photosynthèse suivante :

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{énergie lumineuse} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

En langage commun cela veut dire que la combinaison de six molécules de dioxyde de carbone (CO_2), de six molécules d'eau (H_2O) et d'énergie lumineuse permet la création de sucres simples (les glucoses $C_6H_{12}O_6$) et d'oxygène (O_2)

Que la combinaison d'un gaz avec de l'eau et de la lumière génère de la matière et de l'oxygène indispensable à notre respiration est déjà extraordinaire.

Mais la formule de la photosynthèse intégrale (non simplifiée) de la photosynthèse l'est encore plus :

$$6\,CO_2 + 12H_2O + 675\,\text{kcal} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

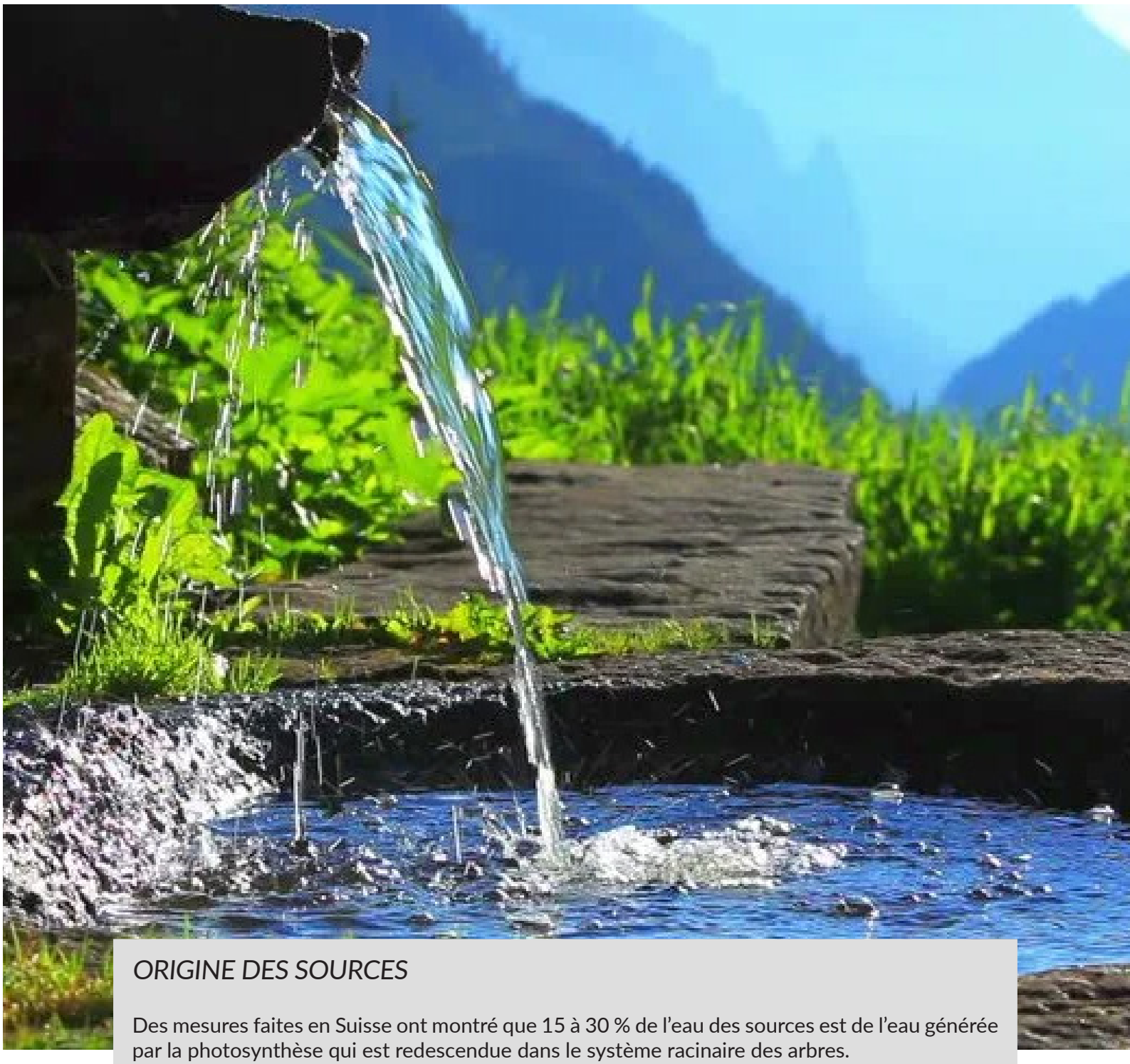
Dioxyde de carbone	+ Eau	+ Énergie solaire	+ Enveloppe vivante	→ Glucose	+ Oxygène	+ Eau
264 g	**216 g**			**180 g**	**192 g**	**108 g**

Autrement dit : du dioxyde de carbone (CO_2) + de l'eau (H_2O) + de l'énergie solaire (kcal) + l'enveloppe vivante se transforment (→) en glucose ($C_6H_{12}O_2$), en oxygène (O_2) et en eau (H_2O).

En fait, douze molécules d'eau entrent dans ce cycle avec six molécules de dioxyde de carbone et l'énergie solaire au sein d'un système vivant, car il ne faut pas oublier que c'est dans une enveloppe vivante que le processus a lieu.

Il en résulte de la biomasse vivante faite notamment de glucose (qui est à l'origine de la cellulose, l'hémicellulose et la lignine), de l'oxygène, et de l'eau. Cette biomasse est inédite, cet oxygène est nouveau, et l'eau produite est aussi de l'eau nouvelle.

Avec presque rien la photosynthèse crée des matières nouvelles, qui sont essentielles à la vie.



ORIGINE DES SOURCES

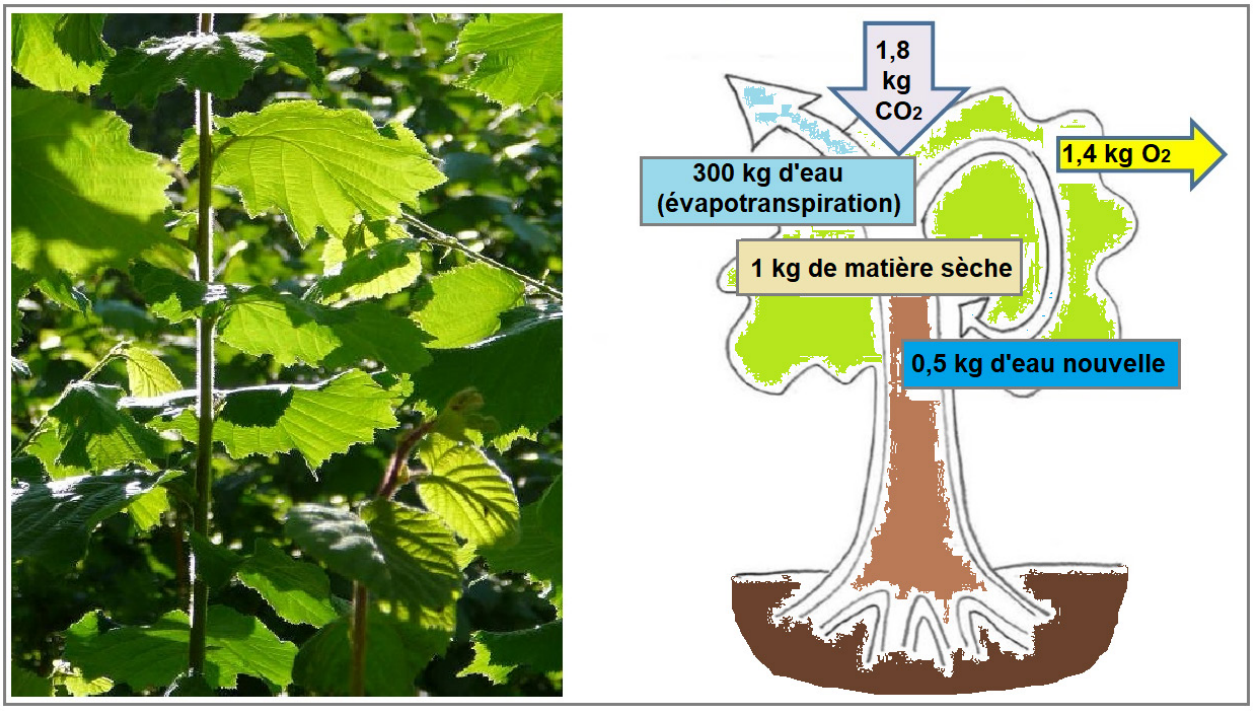
Des mesures faites en Suisse ont montré que 15 à 30 % de l'eau des sources est de l'eau générée par la photosynthèse qui est redescendue dans le système racinaire des arbres.

Les arbres alimentent donc les sources directement.

Les sources sont également abondées par l'eau générée par la décomposition du bois et de la matière organique.

Ces deux formes d'eau nouvelle formeraient plus de la moitié de l'eau qui coule des sources.

Ainsi, si une part d'eau de pluie alimente les sources, elles le sont surtout par l'eau issue du cycle de la vie et de la mort d'organismes vivants, comme les arbres.



La photosynthèse. Source : Ernst Zürcher

VOIE DE LA BIOMASSE

Dans un cycle naturel, à la formation de la biomasse vivante, succède une phase de dégradation et de digestion de cette biomasse qui en se dégradant va également produire une eau nouvelle.

Lors de la dégradation de la plante, les glucides et avant tout, la lignine et la cellulose vont être décomposés notamment grâce aux champignons. Cette décomposition opère un genre de dissociation des composants chimiques de la matière organique qui est presque un retour aux substances de départ.

Voici l'équation de ce processus :

$C_6H_{12}O_6$ +	$6O_2$	→	$6CO_2$ +	**$6H_2O$**	+ 686 kcal/Mol
Glucose	+ Oxygène	→	Dioxyde de carbone +	**Eau**	+ Énergie
180 g	192 g		204 g	**108 g**	

On remarquera que, dans cette équation, l'eau (H_2O) n'est pas un intrant, mais un produit sortant.

La décomposition de la matière organique — le glucose ($C_6H_{12}O_6$) ou le bois — est une réaction d'oxydation lente.

Le bois qui s'oxyde avec l'oxygène de l'air redonne du dioxyde de carbone et de l'énergie disponible pour les microorganismes par exemple, et ça redonne aussi de l'eau nouvelle par les microorganismes du sol qui produit du CO_2, de l'eau, et de l'énergie. Cette eau est bien nouvelle puisqu'elle provient de l'hydrogène et de l'oxygène des sucres qui se reconstituent sous forme d'eau.

Les vapeurs qui s'échappent d'un tas de fumier (d'où le nom fumier : « *qui fume* ») par temps froid témoignent de l'eau produite par la décomposition de la matière organique et de la montée en température du tas de fumier grâce à l'énergie dégagée par la réaction. Un phénomène analogue joue également pour les sols forestiers.

La décomposition de 180 g de biomasse produit 108 g d'eau, soit 60 % d'eau !

De l'eau nouvelle est donc créée par deux fois par le végétal : lors de la biosynthèse et lors de la dégradation de la matière organique.

> *« Si on considère le cycle de la vie végétale dans son ensemble, on voit que le cycle formation et dégradation d'un kilo de biomasse, produit plus qu'un kilo d'eau nouvelle.*





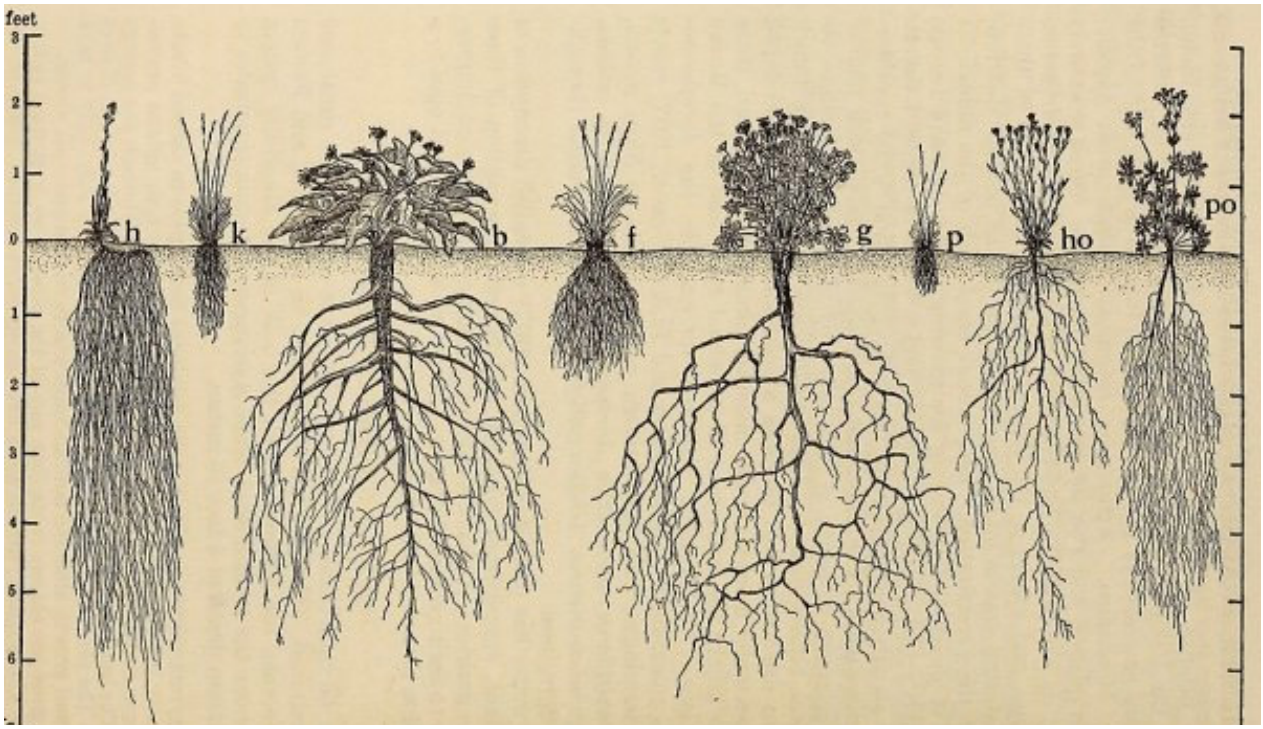
C'est une chose assez intéressante et certains scientifiques ont même été jusqu'à dire que la photosynthèse est un prétexte pour faire de l'eau nouvelle.»

Ainsi on pourrait donc presque dire, avec Ernst Zürcher, que la photosynthèse et la dégradation de la biomasse sont en premier lieu un cycle de génération et de régénération de l'eau.

La production de biomasse vivante intéresse avant tout les cultivateurs, mais ils gagneraient à comprendre qu'en cultivant des végétaux et en particulier des arbres, ils cultivent et produisent de l'eau.

La couverture permanente des sols par des plantes ou par un paillis, non seulement protège la terre et les microorganismes qui la peuplent des effets délétères de l'exposition directe au soleil, mais elle produit également de l'eau.





VOIE RACINAIRE

Nous venons de voir, avec Ernst Zürcher, que la dégradation de la biomasse produit de l'eau nouvelle.

La biomasse ligneuse qui se décompose à la surface du sol est visible, mais il y a aussi des racines souterraines qui ont vécu, qui ont poussé et qui se décomposent aussi.

En pays tempéré, on assiste chaque automne à la chute des feuilles des arbres, mais hors de notre champ visuel, rappelle Ernst Zürcher, il y a aussi déperdition et dépérissement des racines et naissance de nouvelles racines qui se développent sous une forme très particulière à haute teneur en lignine.

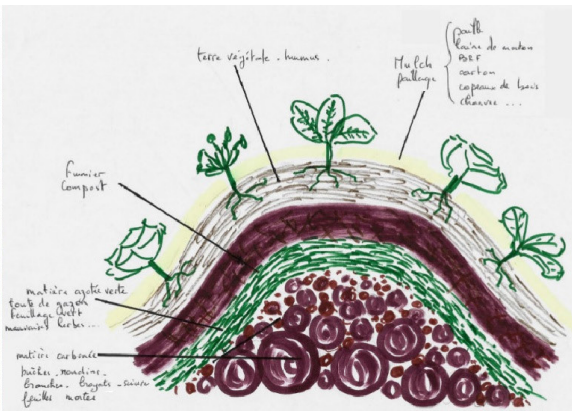
Il y a à peu près 30 % de lignines en plus dans les racines des arbres par rapport aux racines des plantes herbacées.

Cette haute teneur en lignine est précieuse parce qu'elle est une garantie de structuration et de stabilité des sols. Comme la lignine se décompose beaucoup plus lentement que la cellulose, l'eau nouvelle produite par la décomposition de la lignine est relâchée très, très lentement.

Dans les contextes où cultiver sur butte est approprié, les levées de terre qui intègrent du bois en décomposition profitent de ce système « *l'eau-tech* » de goutte-à-goutte souterrain pendant des années voire des décennies. Le bois se décompose lentement, ce qui donne de la chaleur, de l'énergie et de l'eau nouvelle très très lentement.

Les plantes profitent pleinement de cette eau nouvelle très différemment de l'eau d'irrigation en surface, ce qui pose une série de problèmes que nous examinerons plus loin.





Par ailleurs, explique Hervé Coves, l'introduction d'arbres et de haies dans les systèmes de culture permet de disposer d'une réserve d'eau racinaire :

> « *Lorsqu'à des moments appropriés, je taille sévèrement les arbres fourragers que j'ai installés dans ma parcelle ou les trognes de mes haies, une grande partie des radicelles de l'arbre va se décomposer, et cette décomposition va libérer de l'eau qui va être disposition de l'arbre qui va repousser, et cette eau va être également à la disposition des plantes environnantes.*
>
> *En coupant les couverts végétaux à maturité, la décomposition de leurs racines va aussi produire de l'eau et des nutriments, qui seront disponibles pour les plantes que je vais faire pousser dans le couvert détruit.*
>
> *Finalement, la mort d'une plante génère de l'eau.* »



Haie fourragère



Haies et alignements trognes et frênes têtards dans le marais Poitevin (Photographie : Thierry Degen / Terra)

« Dans un système bien géré où les symbioses sont maximisées, pendant les périodes où il fait très chaud, si on additionne l'eau de condensations qui peut représenter 50 % des besoins journaliers des plantes, plus l'eau de décomposition qui peut représenter 20 à 25 % de ces besoins, plus l'eau issue de la photosynthèse, on peut couvrir plus que les besoins des plantes qui ont tellement d'eau à certains moments que des sources peuvent renaître. La vie et notre interaction avec le milieu peuvent permettre cela. »

Master classe avec Hervé Coves
« De l'art de récolter le soleil et de cultiver la pluie : sur le chemin de la fécondité »

2| L'EAU ET LE SOL

OÙ L'ON APPRENDRA QUE LES SOLS PEUVENT ÊTRE DES ÉPONGES POUR PEU QU'Y SOIT CULTIVÉE LA VIE DANS SA DIVERSITÉ.



Oued dans le désert du Néguev (Photographie Mark A. Wilson)

COMMENT SONT APPARUS LES SOLS ?



Marc André Selosse nous aide à imaginer ce que furent les paysages terrestres avant qu'il y ait du sol.

« Il y avait de vagues croûtes de bactéries, un peu comme ce qu'on a sur les façades ou sur les falaises aujourd'hui, ce qu'on appelle des biofilms qui, dès qu'ils devenaient un peu épais, étaient emportés par la pluie. Et donc, entre deux pluies, il n'y avait rien, il n'y avait que la roche avec une petite croûte de microbes qui ne retient pas beaucoup d'eau.

Tout a changé quand des plantes alliées avec des champignons sont devenues terrestres. Ce couple qui est sorti de l'eau a donné naissance aux champignons mycorhiziens.

Dès lors, les champignons aidés par les plantes ont pu attaquer la roche-mère ; les débris de plantes se sont accumulés ; les racines et les champignons ont retenu tout ça, on a vu apparaître un sol qui retient l'eau, l'altération des roches s'est accélérée, et finalement on a vu apparaître en milieu terrestre un endroit où il est possible de vivre quand on a vraiment besoin d'eau.

Des organismes sont sortis de la mer à ce moment-là. Tous nos ancêtres sous-marins. Il y a beaucoup d'organismes dans le sol dont les ancêtres vivaient à la surface du sol. Pensez à la taupe ou à un certain nombre d'insectes. Leurs ancêtres vivaient en surface et ils ont colonisé les sols.

Il y a aussi dans le sol des organismes qui sont directement sortis de l'eau parce que leur mode d'organisation fait que de toute façon ils ne peuvent pas vivre à l'air libre.

C'est le cas des vers et des pauropodes [qui sont de minuscules mille pattes] dont aucun représentant ne vit à la surface du sol. Ils ne peuvent vivre que dans le sol parce que là il y a assez d'eau retenue pour qu'ils ne se dessèchent pas.

C'est le cas d'un de nombre de microanimaux qui sont trop petits pour être connus visuellement dans les sols et qui n'ont pas d'équivalents terrestres. Il faut bien réaliser que ce qui vit dans le sol a besoin d'une ambiance très humide avec beaucoup d'eau — pas forcément sous forme liquide, mais aussi sous forme de vapeur.

Dès l'origine, le sol est quelque chose qui a amené de l'eau sur terre parce qu'il est capable de la retenir.

En fait, il faut réaliser comment le cycle de l'eau a changé quand les sols sont apparus.

Avant, nos paysages ressemblaient à celui créé par les ruissellements qu'on a sur les plages à marée basse ou à celui des oueds.

On avait des débris minéraux qui étaient charriés, puis quand la lame d'eau était passée après la pluie, ils étaient déposés plus loin, puis repris et charriés encore jusqu'à arriver lentement à la mer.

On avait des cours d'eau qui, comme les oueds, serpentent, changent de lit et de direction à chaque pluie. On avait l'équivalent des chenaux d'écoulement de l'eau des plages à marée basse.



Plage de sable ridé à marée basse
(Photographie Heurtelions, Wikimédia)

Avec la formation des sols est apparue une sorte de salle d'attente pour l'eau parce que les sols la retiennent, puis la dégorgent graduellement. Du coup, ils écrêtent les crues, et soutiennent les étiages.

Si les sols ressuient lentement entre deux pluies, c'est à la fois parce que l'eau a du mal à passer dans les sols qui ont des trous qui ne sont pas forcément jointifs et que donc l'eau est transitoirement retenue, mais c'est aussi parce que l'eau est activement retenue par les sols. Une fraction de l'eau met du temps à être arrachée et ne s'arrache pas trop.

Mais la modification majeure du cycle de l'eau permise par la création du sol par les plantes et les champignons c'est que, non seulement maintenant l'écoulement de l'eau est lent, mais surtout qu'elle repart par évaporation, ce qui était tout à fait mineur quand il pleuvait et que presque tout ruisselait.

Avec la colonisation des surfaces terrestres par les plantes et la formation des sols, l'eau va s'évaporer de la surface du sol ; elle va aussi s'évaporer par transpiration des végétaux, c'est-à-dire qu'elle va passer du sol dans la sève puis dans les feuilles où elle s'évapore. La somme de tout ça est ce qu'on appelle l'évapotranspiration. »



Évapotranspiration (photographie Richard Whitcombe)

LA PROPRIÉTÉ D'UN SOL VIVANT EST DE RETENIR L'EAU SANS PERDRE SA STRUCTURE



Pour qu'un sol retienne l'eau, il faut qu'il soit vivant, qu'il contienne de la matière organique, qu'il soit protégé par un couvert végétal, et pour que l'eau puise être ramenée des couches profondes du sol, il faut également des arbres.

La présence simultanée de plantes annuelles et leurs racines superficielles, d'arbustes avec leurs racines un peu plus profondes et d'arbres avec des racines profondes va permettre l'exploration de tous les profils du sol.

L'arbre par sa plus grande capacité d'évapotranspiration va créer un microclimat. Une haie d'arbres va éviter le dessèchement des sols en les protégeant du vent.

L'enracinement va permettre le phénomène d'ascenseur hydrique qui sera renforcé par la présence de mycorhizes.

De plus les différences de hauteurs entre strates de végétations vont permettre des condensations en créant des différences de températures.

L'autre caractéristique d'un sol vivant — et de tout être vivant — est d'être résistant à l'eau.

L'eau ne le dissout pas et ne le déstructure pas. Les précipitations n'emportent pas un sol vivant et l'érosion reste minime.

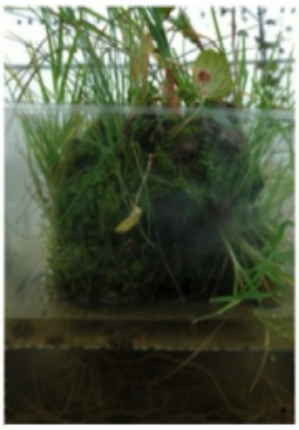
Là encore, c'est la vie du sol et l'activité de la faune du sol qui permettent cela en structurant le sol d'une manière spécifique qu'aucun outil humain ne peut reproduire.

C'est aussi la présence de matière carbonée qui tient et structure le sol. L'humain peut jouer un rôle essentiel dans le cycle de l'eau, sur les sols qu'il occupe s'il ne perturbe pas la vie du sol et l'enrichit de matière à teneur en carbone élevée, comme les pailles, les rameaux de bois fragmentés et d'autres matières végétales sèches qui ont donc un plus fort ratio de carbone sur azote (C/N).

Une série d'expérimentations conduites par François Mulet et Konrad Schreiber montre la variabilité de la résistance à l'eau des sols selon qu'il s'agit de sols vivants ou non, et selon le type de matière organique incorporée à la terre.

Test de stabilité structurale à l'eau

Mottes de sol plongées dans un bac d'eau.



Sol vivant après plusieurs semaines



Sol mort après 30 minutes



Les porosités mécaniques ne sont pas résilientes à l'eau et à la gravité

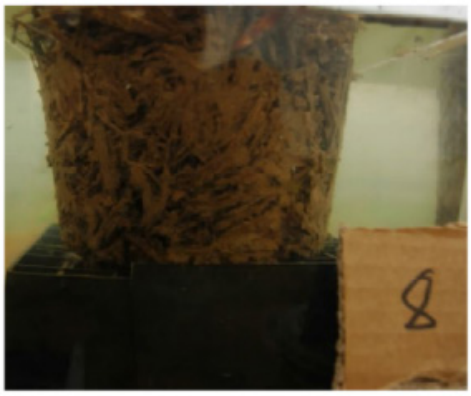
Test de stabilité structurale à l'eau après 5 mois de mélange



1 kg de terre mélangé à 100 g de compost



1 kg de terre mélangé à 100 g de d'herbe



1 kg de terre mélangé à 100 g de paille

Les expérimentations 6, 7 et 8 photographiées ci-dessus ont consisté à mélanger un kilo de terre en mauvais état (c'est-à-dire avec un faible taux de vie organique) avec cent grammes de compost ou d'herbe ou de paille, et à laisser le tout composter à froid pendant cinq mois au cours desquels la matière organique s'est décomposée lentement.

Les mottes des différents mélanges ont ensuite été plongées dans de l'eau

La motte de terre seule (non mélangée à de la matière organique) a fondu et est devenue de la boue en 10 minutes après immersion dans un bac d'eau.

L'apport de compost ou d'engrais vert n'a guère modifié cette réaction.
Ces deux matières n'améliorent pas la résistance à l'eau, leur incorporation dans un sol ne contribue donc pas à structurer celui-ci et à augmenter sa porosité tout en maintenant sa stabilité.

En revanche, avec un apport de paille, c'est-à-dire d'une matière à forte teneur en carbone, la motte de terre a complètement retrouvé ses propriétés de résistance à l'eau ; l'incorporation de paille contribue donc à structurer le sol, même indépendamment de son taux de vie biologique.

La spécificité de l'apport de carbone n'est pas étonnante ; elle est une règle des milieux vivants.

De manière schématique on peut dire que les matières vivantes sont composées d'une structure et d'une enveloppe carbonée qui contient de l'eau et des éléments solubles et qui résiste à l'eau qui lui est extérieure.

Les enveloppes carbonées du vivant créent un milieu intérieur qui contient de l'eau qui résiste au milieu extérieur.

Tout un chacun sait que si on coupe ou si on broie un organisme vivant, il saigne, suinte de la sève, de la lymphe, ou d'autres liquides physiologiques.

Le sol réagit de la même façon à la déstructuration par une houe, une bêche, une charrue ; si on le déstructure par une action mécanique, il fuit tout comme n'importe quel autre organisme vivant même s'il n'est pas tout à fait structuré de la même façon.

En effet, le sol n'est pas un milieu purement organique, mais un milieu organominéral ; il est composé à la fois de minéraux provenant de la roche mère, de matières organiques mortes et d'êtres vivants (vers de terre, termites, bactéries, amibes, champignons…

Comme les êtres vivants, le sol perd sa fonctionnalité lorsqu'il est mécaniquement déstructuré.

Il perd notamment sa porosité qui permet l'infiltration et la rétention d'air et d'eau.

Un sol non structuré par le vivant et la matière organique digérée devient sensible à l'érosion hydrique…



… et à l'érosion éolienne.



Tempête de poussière en Nouvelle-Galles du Sud (Australie) photographiée par drone

L'EAU CIRCULE AVEC LA VIE

Les mouvements ascendants et descendants de l'eau dans le sol ne sont pas seulement liés à la plus ou moins grande porosité du sol, mais à la vie biologique souterraine et notamment aux bactéries qu'il renferme.

« Lorsqu'une goutte d'eau tombe sur le sol, les bactéries qui la reçoivent se gorgent de l'eau dont elles ont besoin et transmettent aux bactéries inférieures l'eau en excès.

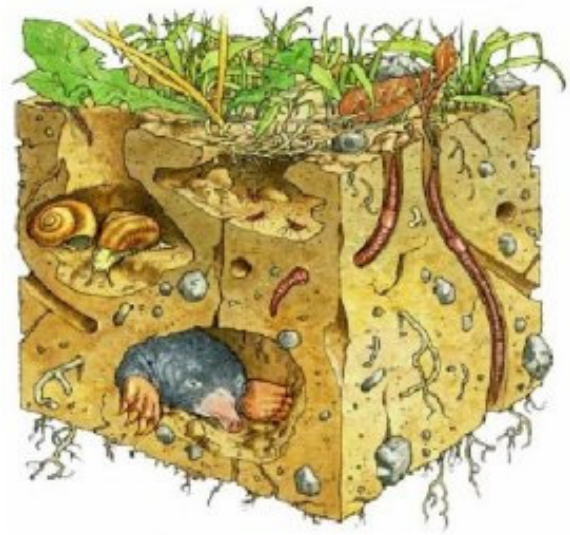
L'eau qui pénètre le sol par les orifices creusés par les vers de terre se transmet de bactérie à bactérie, jusqu'à la roche mère, la nappe phréatique. Quand la surface est carencée en eau, l'eau remonte par ces mêmes voies bactériennes.

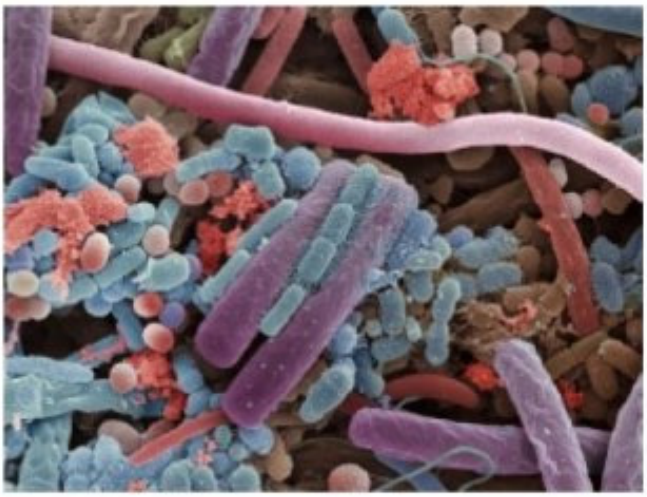
L'eau qui crée la vie circule ainsi avec la vie. L'eau qui est descendue peut remonter et être mise à disposition des organismes qui en ont besoin. Mais ce processus suppose une condition : qu'il n'y ait pas de charge d'évaporation en surface. Si la pompe fuit, elle est arrêtée.

Un sol nu et labouré va anéantir le système de circulation et de mise à disposition de l'eau. Le travail du sol fait disparaître la partie aérobie du sol [où circule l'air et l'oxygène]. Or, dès que celle-ci disparaît, on rentre dans une phase de désertification.

Plus on avance dans la connaissance du vivant, plus on s'aperçoit de l'utilité des choses et des êtres. On prend aussi conscience que l'important dans la vie, ce sont les équilibres. Considérant le mécanisme de circulation de l'eau dans les sols, une conclusion s'impose : la sécheresse n'est jamais un état naturel.

Elle est toujours le produit d'un stress, le résultat d'une intervention humaine, ou d'une catastrophe. »
– George Oxley (Conférence)





L'eau pénètre par les petits orifices creusés par la faune, les petites racines et les micro-organismes du sol et elle se transmet de bactérie à bactérie jusqu'à la roche mère.
De la même manière l'eau de nappe phréatique peut aussi remonter

S'il ne subit pas de pratiques agricoles ou urbaines inappropriées, le sol est un organisme vivant qui est peuplé :

– dans ses cinq premiers centimètres de bactéries aérobies de surface, c'est-à-dire de bactéries qui ont besoin de l'oxygène de l'air pour vivre ;
– entre cinq et dix centimètres de profondeur, le sol abrite des bactéries aérobies profondes
– en dessous de dix centimètres, de bactéries anaérobies ;
– au niveau de la roche-mère, de bactéries anaérobies qui décomposent la roche-mère et fournissent des éléments au sol qui vont permettre aux plantes de pousser. Il s'agit notamment de la potasse, du magnésium, du calcium et du phosphore.

Gérard Ducerf, apporte des précisions sur les conditions de porosité d'un sol :

« Quand un sol fonctionne bien, il est vivant, il est aéré, il est poreux : tout circule. Quand il pleut, l'eau tombe sur le sol, et l'amène à saturation. Quand il est saturé, les bactéries aérobies et anaérobies vont, par des échanges

électriques, faire pénétrer cette eau dans les couches profondes et alimenter les nappes phréatiques. Les racines des plantes vont aussi participer à l'alimentation des nappes phréatiques.
Quand il pleut, l'eau va alimenter les nappes phréatiques et quand il fait sec, l'eau va remonter par les mêmes canaux et pouvoir alimenter le sol.
Ce système fonctionne quand tout va bien, que le sol est vivant.
Quand le sol passe en anaérobiose, c'est-à-dire quand la vie microbienne aérobie diminue ou disparaît — quelles qu'en soient les causes, qui peuvent être nombreuses — il se passe un phénomène qu'on peut comparer à la mise d'une bâche en plastique à vingt trente centimètres de profondeur sous la surface du sol. Aucun échange ne peut plus se faire entre la couche de sol superficielle et les couches plus profondes. Cette frontière devient infranchissable, aussi bien pour les racines des plantes que pour l'eau.
Quand il pleut, l'eau qui ne s'infiltre plus va ruisseler sur le sol et directement alimenter les ruisseaux et les rivières et très rapidement provoquer des inondations. L'augmentation de la fréquence et de la hauteur des inondations est directement liée à la perte de la porosité des sols agricoles, mais aussi urbains, bétonnés, asphaltés, construits. Dans le même temps, les nappes phréatiques qui ne sont plus alimentées deviennent de plus en plus basses.
Quand il fait sec, le phénomène inverse produit aussi des catastrophes, l'eau des nappes phréatiques ne peut plus remonter et alimenter le sol superficiel, puisqu'il y a une frontière infranchissable entre vingt et trente centimètres de profondeur. Le sol superficiel est condamné à subir la sécheresse.»
– Gérard Ducerf

La porosité des sols est donc capitale en agriculture et pour la sécurité alimentaire.

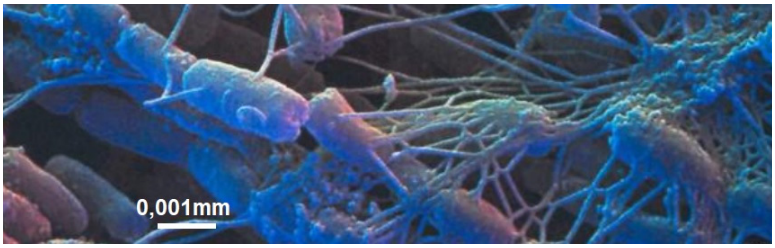
C'est aussi un problème de santé publique, car un volume de sol qui n'a pas de porosité verra des réactions anaérobies se produire en son milieu.

Au cœur d'un volume de sol d'un centimètre cube de sol en anaérobiose, on va retrouver de l'ammoniaque, des sulfites des sulfures toxiques et jamais de sulfate ni de nitrate bénéfiques. De plus la perte de porosité va provoquer le lessivage des sols, c'est-à-dire la fuite des sédiments, engrais, pesticides, etc. des sols.

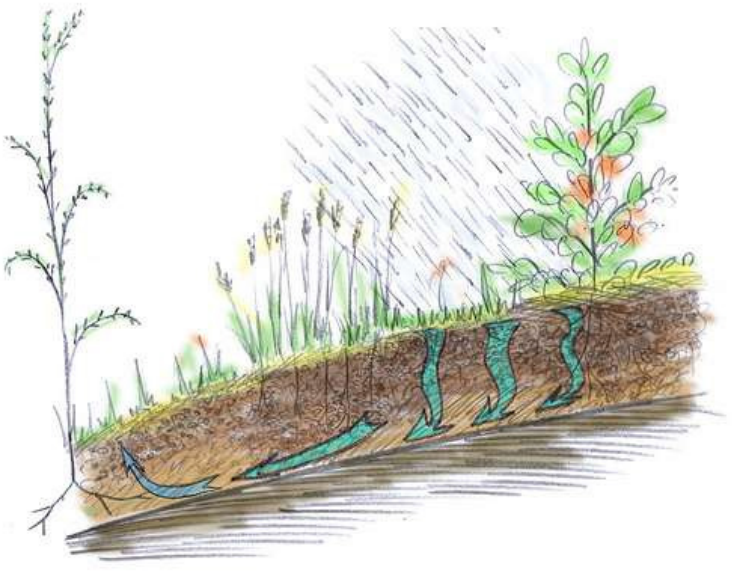
Ce phénomène a pour conséquences non seulement l'appauvrissement des sols lessivés qui perdent les nutriments nécessaires à la croissance des plantes, mais aussi la pollution des cours d'eau et des eaux distribuées pour la consommation.

Gérard Ducerf estime que les trois quarts des inondations sont liés aux pratiques agricoles qui entraînent la perte de porosité des sols. La création d'une frontière imperméable à une trentaine de centimètres de profondeur va également provoquer des problèmes de glissement de terrain et d'effondrement dans les deux sens. L'érosion actuelle, dans un pays comme la France entraîne la perte de sept à trente tonnes de terres par hectare et par an. Cette terre qui s'en va peut provoquer des glissements de terrain et, quand il fait sec, l'impossibilité pour l'eau de remonter des nappes phréatiques va provoquer un phénomène de rétractation des sols notamment argileux qui font que des bâtiments vont s'affaisser et commencer à s'effondrer.

L'effondrement de la vie biologique des sols, la perte de porosité des sols et la rupture du cycle hydrologique normal qui s'ensuivent ont donc des conséquences catastrophiques dans beaucoup de domaines.



Chaque gramme de sol vivant renferme entre un et quatre milliards de bactéries
et des dizaines de mètres de filaments mycéliens



Lessivage des sols par la création
d'une barrière infranchissable entre sol
superficiel et profond

COMMENT L'EAU EST-ELLE STOCKÉE DANS LE SOL ?



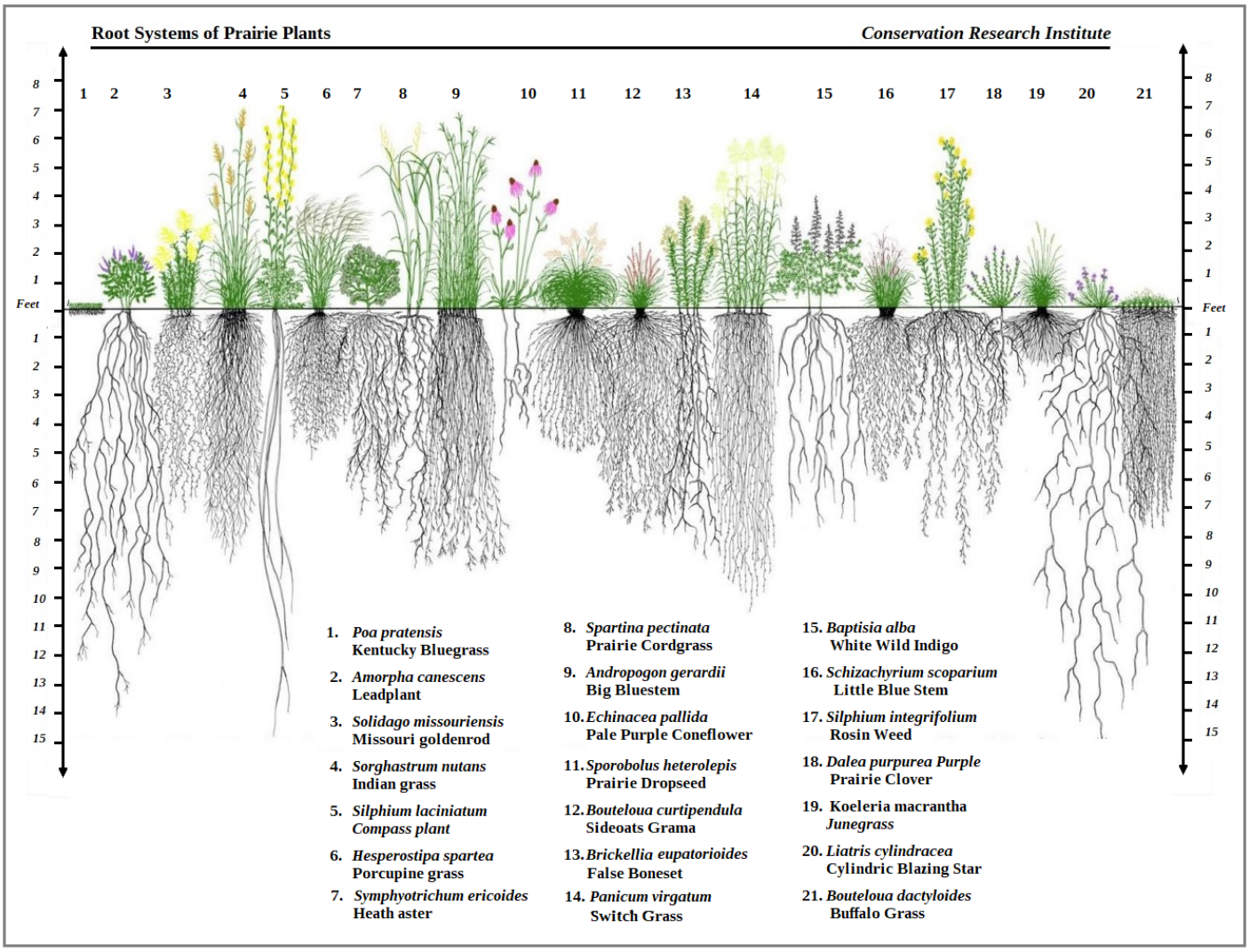
Système racinaire d'un jeune pin

Le potentiel d'infiltration et de stockage de l'eau dans les sols varie considérablement non seulement selon leur nature (sableuse, argileuse, calcaire…), mais aussi, et surtout selon la présence ou ou non de couverture végétale et la richesse ou la pauvreté de la vie et de la biodiversité du sol.

« Les bactéries, les champignons sont des réserves d'eau biologique qui est disponible pour les plantes. L'eau non biologique, elle, est stockée dans les pores du sol, et plus précisément dans les mésopores et micropores (trous de taille moyenne et toute petite).
Les canaux les plus gros, comme ceux des vers de terre par exemple, sont des canaux de drainage par lesquels l'eau s'écoule pour qu'il n'y ait pas d'excès ni d'hydromorphie.
L'essentiel de l'eau est stocké dans les plus petits canaux du sol. Or ces petits canaux qui conservent l'eau ne sont créés que par la biologie, par les bactéries, les amibes, les mycorhizes et les racines les plus fines des plantes.
Cette microporosité ne peut être créée mécaniquement avec des outils. Seules la microfaune et la microflore du sol sont capables de composer l'architecture fractale de cette microporosité qui colle et stocke l'eau contre les parois des pores sous forme de films.
Donc si on veut disposer d'un sol "éponge" riche en eau, il faut favoriser la vie du sol.
C'est là que le cycle de l'eau et le cycle du carbone sont liés, car les microorganismes maintiennent l'architecture du sol avec des matériaux carbonés que les plantes relâchent dans le sol.
Ainsi en résumé, si on veut avoir un sol qui a une grande capacité à retenir de l'eau, il faut maximiser la production de photosynthèse pour nourrir beaucoup de microorganismes qui eux-mêmes vont créer de l'espace pour stocker l'eau.
Les sols couverts stockent jusqu'à cinq fois plus d'eau et, s'ils contiennent un profil diversifié d'enracinement des plantes avec des racines très profondes, ils draineront encore mieux l'eau lorsque celle-ci est en excès. »

Dans la prairie naturelle des grandes plaines des États-Unis, les racines des plantes descendent jusqu'à six mètres de profondeur ce qui fait qu'elles disposent d'une réserve d'eau utile considérable et peuvent gérer sans difficulté les cycles de sécheresse et pluies de trois ans en fournissant un volant très important de matières carbonées liquides sous forme d'exsudats racinaires aux microorganismes du sol.»

– Arthur Buresi



Toutes les plantes n'ont pas la même capacité à stocker l'eau, les arbres résineux stockent moins que les arbres feuillus.

Le mélilot est une plante extraordinaire pour stocker l'eau dans un sol sableux; *Amorpha canescens*, *Brachiaria ruziziensis* également connue sous le nom de « *Congo grass* », espèce de graminées d'Afrique tropicale du genre *Brachiaria* est une autre plante extraordinaire pour sa capacité à développer un enracinement profond, le lupin qualifié de marteau-piqueur végétal, le sorgho, l'éleusine… sont d'autres plantes qui restructurent les sols en profondeur et fournissent un apport important en matière organique et en eau par la densité de leur réseau racinaire.
Outre les plantes elles-mêmes, la matière organique issue de la digestion des plantes mortes stocke également de l'eau :

«Un kilo de matière organique carbonée stocke un kilo d'eau, cinquante tonnes de matière organique carbonée à l'hectare vont donc stocker cinquante tonnes d'eau ce qui équivaut à un bel arrosage, et comme l'évaporation d'un gramme d'eau produit une frigocalorie1 refroidissant, l'apport de matière carbonée est un moyen d'empêcher la montée en température des sols.»
– Gérard Ducerf

DES PETITS TROUS, DES PETITS TROUS, TOUJOURS DES PETITS TROUS…

Lors d'une intervention publique organisée à Elne, en mai 2021 dans le cadre du « *Festival des Rencontres de l'Agroécologie du bassin méditerranéen* », le botaniste Marc-André Selosse a dressé de manière très pédagogique un état de l'art des connaissances sur les conditions permettant la porosité des sols[1]. En voici, un long extrait[2] :

« Qu'est-ce qui retient l'eau ?
Je vous ai dit que la formation des sols fut consubstantielle à la présence d'eau au milieu terrestre, puis que la présence des sols et des plantes avait profondément modifié le cycle de l'eau.

Maintenant, je voudrais vous convaincre qu'il y a plusieurs facteurs qui retiennent l'eau dans les sols. J'ai évoqué la présence de trous dans les sols qui sont mal jointifs et qui ralentissent l'écoulement. Il y a donc de l'eau qui est ralentie juste parce qu'elle est en train de passer, mais qu'elle met du temps à passer, mais il y a aussi de l'eau qui est retenue.

L'eau est retenue par deux choses : d'abord par la matière organique du sol qui est hydrophile. L'essentiel de la matière organique notamment tous les polysaccharides, la cellulose et d'autres composants comme ça ont de l'affinité pour l'eau, ils la retiennent, or dans les sols, il y a où il devrait y avoir de la matière organique.

La matière organique est un des facteurs qui retient l'eau, mais ce n'est qu'un des facteurs. Il y a également les pores. On peut distinguer deux types de pores : ceux qui sont assez gros ne retiennent pas trop l'eau. Ces pores-là sont très importants plutôt pour l'oxygénation. Les petits pores ont la propriété de retenir l'eau.

Vous pouvez le vérifier par une expérience très très simple : vous prenez un mouchoir en papier et en tissu, vous le trempez dans le café et vous voyez le café monter.

Ce phénomène est en partie lié au fait que le mouchoir est fait de cellulose ou de fibres végétales hydrophiles, et surtout au fait que sa matière est pleine de petits trous entre les fibres de cellulose, de coton, ou autres végétaux qui le constituent. De plus il faut savoir que les fibres sont des cellules et donc qu'à l'intérieur il y a des microtrous capables d'attirer et de retenir l'eau tellement fort qu'elle peut même monter contre la gravité.



L'effet de rétention et de capture active de l'eau par des matières poreuses peut également être trivialement observé en trempant légèrement un morceau de sucre dans du café. La capillarité peut être utilisée pour créer des systèmes d'irrigation ou de filtration de l'eau.

Donc ce qui compte pour retenir l'eau, ce sont ces petits trous. Ce n'est pas que les gros trous soient inutiles, ils sont nécessaires aussi parce qu'ils se vident après la pluie et qu'ils vont permettre à l'air de passer.

Mais ce n'est pas le tout d'avoir des trous, il faut qu'ils soient stables. Avec la gravité, les trous dans le sol s'effondrent. Pour être stabilisés, il faut qu'ils soient étayés. C'est ce qu'on fait dans les mines pour éviter qu'elles s'effondrent. En terme technique, on dit qu'on les étançonne, c'est-à-dire qu'on les étaye avec du bois qu'on conforte avec la matière organique qui est collante, gluante, poisseuse. La morve, le mucus des crustacés est l'état moyen de la matière organique dans le sol surtout quand elle est hydratée et, de par cet état collant, les morceaux, les agrégats de sol vont tenir ensemble.

La matière organique permet donc que les trous se tiennent ensemble. Coller, tenir les trous ensemble, voilà l'autre rôle de la matière organique pour retenir l'eau : les petits et microtrous sont plus stables parce que les composants qui sont au-dessus de leur voûte ne peuvent pas s'écrouler et sont retenus entre eux par de la colle organique.

Voilà. On sait donc pourquoi l'eau est retenue dans les sols en plus d'y passer lentement et on commence à comprendre que la matière organique fait partie des substances qui vont être importantes pour ça. Ainsi un sol tenu et structuré par de la matière organique est une éponge.

Certes, c'est une éponge qui finit par sécher bien sûr, mais c'est une éponge, et le cycle de l'eau a été profondément modifié par l'existence des sols.

1 Cette intervention est disponible sur YouTube : https://www.youtube.com/watch?v=foiBiqD06B8

2 Le verbatim de l'intervention et sa tonalité orale ont été respectés autant que possible, seules quelques formulations ont été modifiées. Les parties entre crochets, les notes, et les illustrations sont du transcripteur.

À ce point de mon développement, je ne peux m'empêcher de penser à une série d'expériences qui a été menée par le Cemagref[3] dans un grand bassin de marnes à Draix, qu'on appelle des badlands, parce que l'érosion est telle que la végétation n'arrive pas à s'installer.

On y a fait des manips pour aider la végétation à s'installer en faisant des petits niveaux en plantant des arbres sous lesquels se forme un sol, et on a réussi à végétaliser de petits bassins versants, des petites vallées de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

En comparant à l'exutoire ces bassins végétalisés aux bassins de contrôle semblables, mais non aménagés ni végétalisés, on a pu observer qu'en végétalisant et en reconstituant les sols on arrive à écrêter les crues et à diminuer la charge solide transportée de 90 %. C'est énorme.

On s'aperçoit donc qu'avec la végétation et un sol contenant de la matière organique, on retrouve un cycle et des circulations d'eau habituels.

Par contre sans sol et sans végétation le ravinement et les risques d'inondation sont maximaux.



Exemple de barrière végétale installée dans une ravine pour prévenir les inondations et piéger les sédiments en amont de la rivière Durance, dans les Alpes de Haute-Provence en France.

Le sol a complètement modifié le cycle de l'eau. Son effet éponge repose à la fois sur un frein au passage de l'eau et sur une rétention de l'eau qui est liée à la matière organique et aux petits trous dans le sol. Mais c'est bien beau de dire qu'il y a des trous, mais ces trous, ils viennent d'où ? Il y a des trous, j'allais dire minéraux. Les argiles par exemple gonflent quand il pleut et se dégonflent après. c'est pour cela qu'elles font souvent des craquelures. Il y a donc des sols qui sont minéralement capables de faire des trous, mais c'est anecdotique.

Qui fait des trous dans le sol alors ? On pense d'emblée aux vers de terre, mais avec un diamètre moyen de 1,21 mm les vers font des gros trous et leurs galeries sont très connectées.

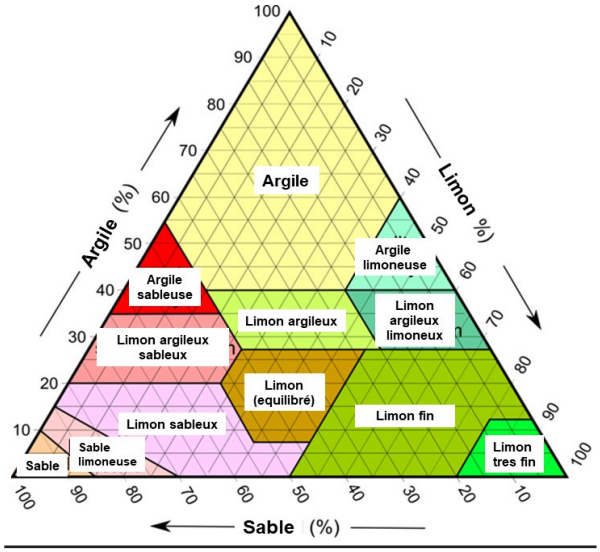


Schéma classique de la texture et de la porosité des sols

Ceux qui s'intéressent aux microorganismes du sol et qui en ont déjà une représentation connaissent le rôle des bactéries des champignons. Mais, il y a dans la microfaune un groupe dont on ne parle jamais et qui pourtant joue des rôles absolument majeurs sur les cycles de la matière, de l'azote et de l'eau, c'est celui des amibes. Les amibes font des trous.

Ces espèces ressemblent un peu à un crachat déformable ; c'est 0 à 100 fois plus gros que les bactéries, d'ailleurs ça mange les bactéries en se déformant et en emballant les bactéries, ça mange aussi des matières organiques, mais surtout ça se déplace en émettant des expansions en ramenant la matière qui est derrière évidemment. En se déplaçant, il leur arrive d'écarter des obstacles et elles laissent derrière elles des trous entourés de sécrétions, c'est-à-dire des trous tapissés de matière organique pure.

Ce sont des petits trous qui font environ 100 microns — un jour nous aurons l'occasion de parler de leur rôle dans les cycles de l'azote, mais sachez que sans les amibes le cycle de l'azote tournerait à l'avantage des bactéries, et qu'il n'y aurait plus de plantes donc plus de sol et plus de bactéries non plus. Les amibes sont vraiment des acteurs majeurs de la vie des sols, or ces acteurs ne font pas partie de notre représentation collective de l'écosystème des sols.

Quoi qu'il en soit, voilà des agents de petits trous.

3 Travaux du Cemagref :
– Compte-rendu de recherches n° 3 BVRE de Draix — Coordination : Maurice Meunier, Cemagref ; T édition (1995).
– Freddy Rey, Jean-Louis Ballais, Alain Marre, Georges Rovéra, « Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface », Compte-rendu Geoscience 336 (2004). https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01569821/document
– Feddy Rey. « Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du Sud ». Sciences de l'environnement. Doctorat Géographie physique, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2002. Français. Fftel-02580848. https://hal.inrae.fr/tel-02580848/document. Voir également : Marine Benoiste et Justine Delangue sous la coordination de Pauline Teillac-Dechamps et Sébastien Moncorps. Les Solutions fondées sur la Nature pour les risques liés à l'eau en France, UICN Comité français (2019). Paris, France. https://uicn.fr/wp-content/uploads/2020/01/sfn-light-ok.pdf

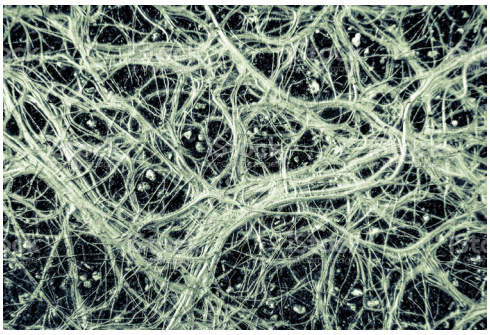
Mais, les plus grands agents de porosité, et c'est cela la bonne réponse à la question que je vous posais, c'est d'une façon générale les plantes. Il y a des sols sans vers de terre, et puis en forêt il n'y a pas beaucoup de vers de terre, ni beaucoup de microfaune, ni beaucoup de bactéries, et dans les sols forestiers très acides, pas beaucoup d'amibes non plus. Alors, qui fait des trous ? Et bien ce sont les plantes qui font des racines. L'essentiel des racines des plantes c'est de toutes petites racines fines, et ces toutes petites racines fines sont partout dans le sol.

Deuxièmement, par des fuites ou par des sécrétions



Amibe

qui leur permettent de modifier le sol et de modifier les bactéries présentes, elles libèrent plein de matières organiques ; c'est ce qu'on appelle la rhizodéposition qui peut atteindre 40 % la photosynthèse. Usuellement on est plutôt à 10 à 20 %.



Les racines fines ressemblent à un réseau de neurones dans le sol

Des molécules sont libérées là, donc les racines fines libèrent de la matière organique et puis finalement meurent les fines racines parce que quand elles ont exploité le milieu soit elles deviennent de plus grosses racines, mais toutes les petites racines fines ne deviennent pas de grosses racines.

Seules quelques-unes deviendront des gros axes de circulation parce que le cheveu racinaire se développera en aval.

La plupart des racines fines meurent ; elles sont alors mangées, et cette matière qui disparaît fait un trou, certes assez linéaire, et qui en conséquence ne retient pas beaucoup l'eau, mais qui en fait est souvent assez petit parce que ça s'effondre autour et donc c'est de la porosité intéressante.

En synthèse, on voit très bien ici que comme les racines font des trous et injectent de la matière organique, parce que quand elles meurent ou quand elles font de la rhizodéposition et produisent de la matière organique, les racines aident à stocker de l'eau. C'est une des raisons pour lesquelles quand vous faites de la vigne enherbée, quand vous avez des couverts entre des plantes que vous récoltez par ailleurs, certes il y a de la concurrence pour l'eau, mais il y a plus d'eau au total.

Qui fait des trous encore ? Il s'agit d'un autre animal qui est d'ailleurs le prédateur majeur des écosystèmes agricoles et qu'on oublie tout le temps. C'est lui qui en consomme l'essentiel de la biomasse. C'est l'Homme !

L'Homme fait des trous en labourant. Les trous faits par labour sont l'exemple même des trous « de merde ». Pourquoi ? D'abord parce que les trous engendrés par cette pratique sont trop gros. Le labour ne crée pas de microporosités et donc ne retient pas l'eau ; ensuite, ces trous, qui ne sont pas consolidés par de la matière organique, s'effondrent rapidement.

Si vous labourez demain, vous devrez labourer après-demain pour refaire des trous et c'est le début d'une dépendance. C'est plus compliqué que ça bien sûr, le labour peut avoir des avantages à court terme, mais il présente aussi de très nombreux autres désavantages à long terme, et sauf cas particulier parce qu'il n'y a pas de règle générale qui soit vraie.

Il y a peut-être des cas où il faudra labourer au moins transitoirement, mais le fait est que globalement le labour à long terme est dangereux. Une des raisons pour laquelle cette pratique est dangereuse est qu'elle aère le sol ; il y a plus de respiration et donc moins de matière organique dont on a vu à quel point elle est très importante pour retenir l'eau.

Et surtout, le labour ne fait pas de trous stables et on est sans cesse obligé de labourer de nouveau. Voilà l'origine des trous les gros et petits et puis les bons et les mauvais. Les mauvais sont tous ceux qui ne sont pas confortés de matières organiques pour les stabiliser.

Je vais terminer en posant la question suivante : comment augmenter le stock d'eau, c'est-à-dire comment faire pour qu'il y ait plus d'eau dans les sols ?

On devine qu'il faut de la matière organique. On devine également qu'il faut de la vie dans les sols parce qu'elle fait des trous. On devine qu'il faut des couverts végétaux parce qu'ils font des trous.



Mais, pour avoir une ressource en eau plus étendue, il faut aussi penser à aller chercher l'eau plus en profondeur et pas simplement dans les zones superficielles d'enracinement des plantes annuelles et des d'arbustes.

Il se pourrait que la réponse à cette question se trouve dans la présence d'arbres et dans l'agroforesterie.

Il faut avoir un système d'exploitation du profil de sol qui va chercher l'eau certes dans les couches les plus superficielles avec des racines de plantes annuelles ou de plantes plus enracinées profondément comme des arbustes ou de la lavande par exemple qui ont des racines plus profondes, plus des arbres qui eux vont chercher beaucoup plus loin.

L'intérêt des arbres dans le dispositif est d'augmenter le volume, la zone de sol explorée.

Et de plus, par leur évaporation, les arbres créent des microclimats, ce qui dans les étés très chauds qu'on a actuellement peut aider et qui font écran contre le vent et en limitent les effets desséchants.

Je voudrais attirer votre attention sur l'intérêt d'avoir des enracinements profonds à côté d'enracinements plus superficiels et là je vais parler de mycorhizes et j'en aurai fini. L'enracinement profond permet la mise en place d'un mécanisme qu'on appelle « l'ascenseur hydrique ».

L'ascenseur hydrique, c'est le fait que quand une plante veut chercher de l'eau en profondeur, cette eau remonte et passe dans des étages du système racinaire qui sont en présence d'un sol plus sec et il y a une partie de cette eau qui reflue dehors.

Bien plus, une partie de cette eau va servir à nourrir les champignons mycorhiziens et dans certains cas les champignons mycorhiziens de surface sont nourris en eau par la plante qui a repris de l'eau plus en profondeur.

Et comme ces champignons ont de l'eau et qu'ils sont connectés éventuellement à d'autres plantes notamment celles qui sont enracinées superficiellement, ils sont, en plus de l'eau qui fuit dans le sol, des voies plus directes pour que cette eau remontée des profondeurs par l'ascenseur hydrique qu'est le système racinaire de l'arbre, et pour que cette eau, disais-je, aille vers des plantes à enracinement superficiel.

En gros, ce que je suis en train de vous dire c'est que, dans certains cas, les réseaux mycorhiziens approvisionnent en eau certaines plantes notamment celles qui à un moment, quand le sol est transitoirement sec en surface, n'ont pas accès à l'eau des profondeurs.

Cela implique que si vous labourez, évidemment vous détruisez tout le réseau mycorhizien et vous perdez cette possibilité-là. C'est à méditer.

Je vous ai dit que le sol c'était l'eau, que le sol modifiait le cycle de l'eau.

On a vu ensemble le rôle de la matière organique et des trous dans cette histoire-là, et puis on a vu ce qui faisait les trous et on a appelé indésirables les trous issus du labour, même si on laisse une porte ouverte au labour dans certaines situations particulières.

Il n'y a pas de règle générale en agriculture. Si on considère qu'il existe des terroirs, on ne peut pas dire que les mêmes règles s'appliquent partout.

Et, dernière chose, nous avons vu aussi que la disponibilité en eau est liée à ce qu'on plante et à la manière dont on travaille le sol. L'agroforesterie est un des moyens de trouver des synergies pour avoir plus d'eau à un endroit donné ».

– Marc-André Selosse

INFLUENCE DES PLANTES ET EN PARTICULIER DES ARBRES SUR LES EAUX SOUTERRAINES

Pour l'agriculteur et agronome Francis Bucaille,

« un sol mort est un sol dont l'horizon de surface n'est plus en relation avec la roche mère. L'excès ou le manque de tel ou tel élément dans un sol ou sa non-biodisponibilité peuvent être facilement corrigés. En revanche, si la relation entre horizon superficiel et horizon profond est cassée, le problème ne se résout pas facilement.

Un sol qui est privé d'enracinement profond pendant trois saisons ou trois années voit sa microfaune profonde disparaître parce qu'elle est privée de nourriture.

Cela peut être le fruit de la culture maraîchère de plantes à enracinement peu profond pendant trois années consécutives. La jachère avec des plantes à enracinement peu profond ne reconstitue pas la fertilité du sol.

Toute forme de vie provient de l'énergie lumineuse du soleil. Le seul moyen qu'ont la faune et les bactéries en profondeur d'accéder à cette énergie est la collaboration des plantes qui via leurs "panneaux photovoltaïques" que sont les feuilles peuvent renvoyer de l'énergie dans le sous-sol. L'énergie ne peut pas venir du dessous ».

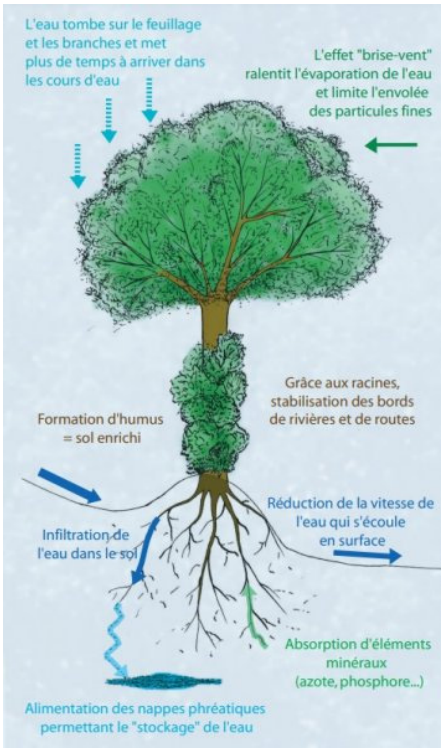
Quand la vigne pousse sur des sols vivants, ses racines peuvent aller jusqu'à trente mètres de profondeur.

Le blé, le colza, l'éleusine sont des céréales à enracinement profond. Les légumineuses sont en général sensibles à la compaction. Les graminées ont un pouvoir racinaire puissant. Le ray-grass est puissant et agressif sur une période courte. L'avoine a pour avantage de rendre les minéraux plus disponibles.

L'important est d'utiliser des plantes à racines fasciculées qui travaillent tout le volume de sol.

Les racines profondes des arbres peuvent, elles, atteindre les nappes phréatiques. Elles établissent la circulation de l'eau d'une part vers le bas et contribuent à faciliter la recharge des nappes souterraines, et d'autre part vers le haut, en remontant l'eau des profondeurs vers des zones où elle sera accessible aux êtres vivants qui y résident.

Les arbres jouent donc un rôle majeur dans le cycle de l'eau, en assurant le lien entre surfaces du sol et réserves souterraines.





Sur cette photo prise pendant une année de sécheresse par l'environnementaliste et régénérateur de milieux dégradés Tony Rinaudo, on peut voir l'impact distinct sur la culture près de la base de l'arbre. La portance hydraulique des essences d'arbres qui ont été plantées favorise la croissance des plantes. Les arbres puisent l'eau en profondeur dans le profil du sol et la rendent disponible près de la surface du sol à portée des racines des végétaux voisins pendant la nuit par leurs racines peu profondes, ce qui permet de bio-irriguer efficacement les cultures.

LES SOLS NUS SONT EXPOSÉS À L'ÉROSION HYDRIQUE



Quand il pleut, les sols nus et labourés ne sont tenus ni par des plantes ni par la matière organique.

Les argiles se mettent en suspension et sont emportées. Aujourd'hui, dès qu'il pleut, les rivières sont pleines de boue. Ça ne gêne plus les humains qui se sont habitués à voir partir leur terre dans les rivières.

Pourtant ce phénomène est totalement anormal, il n'existe que là où vivent les humains. Il n'y a jamais d'eau boueuse dans les milieux naturels.

Une rivière boueuse est le symptôme de sols en train de mourir.

Une eau ne devrait jamais être boueuse.



L'image ci-dessus montre clairement que l'eau qui vient de la forêt — ici amazonienne — n'est pas chargée de boues tandis que celle provenant des champs l'est.

Une fois chargée d'argile, l'eau peut devenir un fléau lors des inondations, alors que l'eau pure, elle, n'entraîne que peu ou pas de dégâts.

En effet, rappelle Claude Bourguignon, la force érosive de l'eau est liée au carré de sa densité.

La densité de l'eau par définition physique c'est un, et un au carré c'est un. L'eau pure, propre n'érode pas. La densité des argiles est 4. Les argiles étant chargées négativement — elles sont colloïdales — elles entrent en suspension dans l'eau.

L'eau argileuse acquiert une force érosive, elle va être capable de soulever les limons, elle va être capable de soulever les sables.

Plus elle va être dense, plus elle va arracher des choses importantes et à la fin elle va faire rouler des cailloux, emporter des voitures.

Ce n'est pas l'eau pure qui fait du dégât, c'est l'eau chargée de terre.



Gigantesque glissement de terrain dû aux inondations à Erftstadt, en Allemagne, le 16 juillet 2021



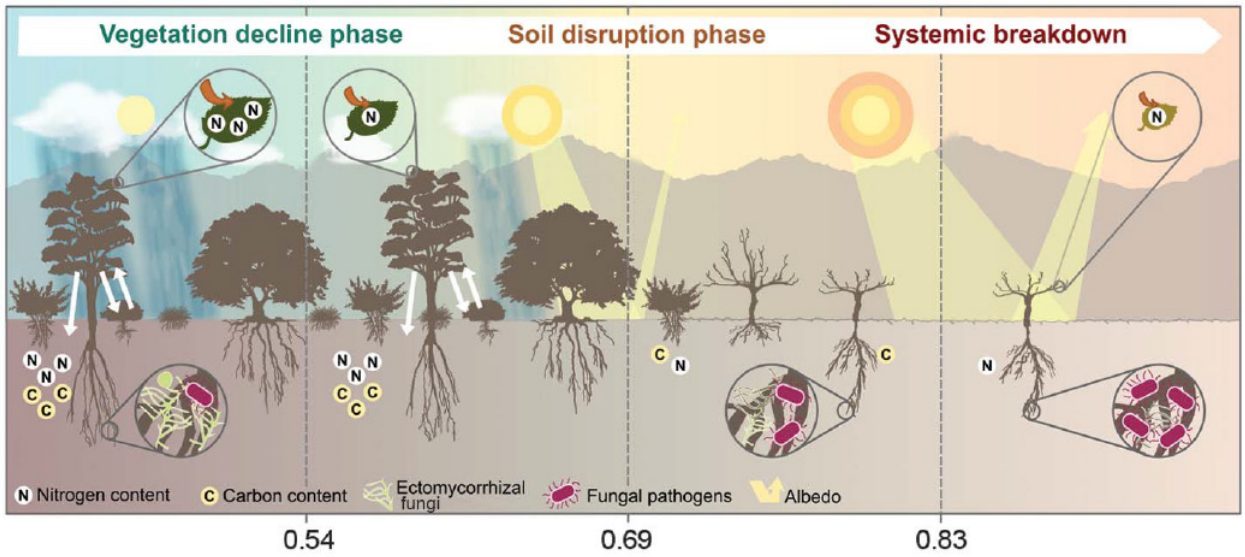
Orangeraies cultivées sur les rives du Rio Uruguay près du barrage de Salto Grande. Le design maximise la couverture végétale et l'organise en courbe de niveau pour réduire l'érosion et augmenter la rétention d'eau. (Photographie : Yann Arthus Bertrand)

3| L'EAU ET LES PLANTES

OÙ L'ON MONTRERA QUE LES FORÊTS GÉNÈRENT DE LA PLUIE SUR LES TERRES ÉMERGÉES ET QUE LE VÉGÉTAL CRÉE DE L'EAU NOUVELLE.



SANS EAU, PAS DE PLANTES



Aridité. Illustration par Dharma Beren Studio

La perte de couvert végétal s'accompagne d'une très faible présence de carbone et d'azote organiques dans les sols.

Une équipe internationale de chercheurs conduite par Miguel Berdugo s'est demandé si l'aridification modifie les écosystèmes de manière graduelle ou abrupte et si elle induit des changements spécifiques ou systémiques des écosystèmes.

Les résultats de leurs investigations[1] montrent que l'augmentation de l'aridité entraîne des changements abrupts en affectant en même temps de multiples paramètres en interaction au sein des écosystèmes.

Ces changements se produisent en trois phases caractéristiques illustrées par la frise ci-dessus.

Les changements de l'écosystème sont associés au franchissement des trois phases identifiées dans cette étude :

1. Le premier seuil se produit lors du franchissement d'un niveau d'aridité de ~0,54. Cette phase est caractérisée par une baisse de la productivité de la végétation et de ses activités photosynthétiques.
2. À un niveau d'aridité de ~0,7, on observe une forte baisse de la fertilité du sol, de la teneur en azote des plantes, des interactions biotiques entre plantes et entre les plantes et le sol. On constate également des changements radicaux dans la composition des communautés microbiennes des plantes et du sol. L'un des apports de cette étude est de montrer que plus on est dans un milieu aride, plus les microorganismes pathogènes prospèrent, tandis que plus le milieu est humide, plus les microorganismes symbiotiques dominent et produisent plus d'azote et de carbone.
3. Enfin, à un niveau d'aridité de ~0,8, on détecte des réductions drastiques de la couverture végétale, des augmentations de l'albédo du sol et des changements dans les caractéristiques des feuilles pour éviter le stress.

1 Miguel Berdugo et al., Global ecosystem thresholds driven by aridity, Science 367, 787–790 (2020)

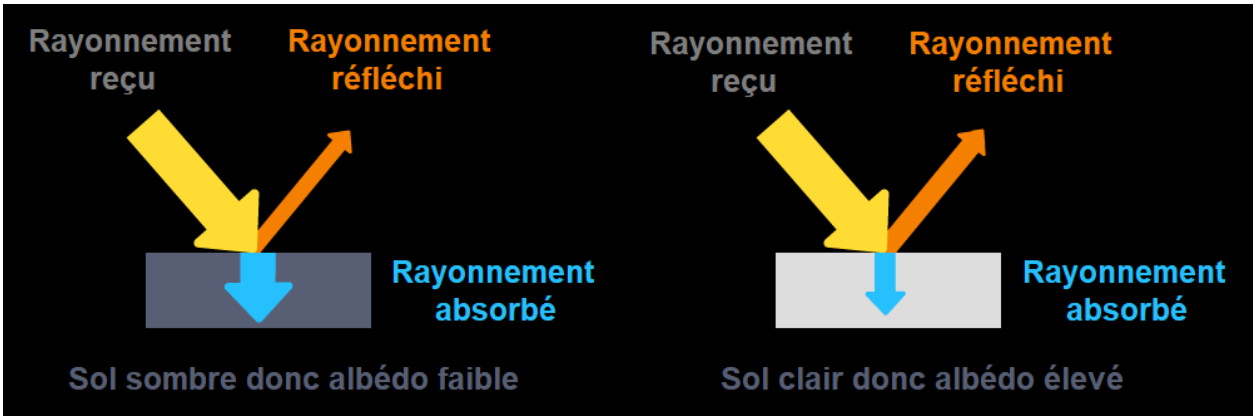
Chacune des phases est ainsi marquée par des diminutions abruptes de la présence et de la productivité des plantes, de la fertilité des sols, de la couverture végétale et de la diversité des plantes aux différents paliers d'aridité : 0,54, ~0,7 et ~0,8.

Quand l'humidité diminue, la climatisation de l'écosystème diminue, la végétation s'amenuise et sa diversité s'appauvrit, et il y a de plus en plus de soleil. Plus le sol devient nu, plus de lumière se reflète, en terme scientifique, on dit que l'effet d'albédo augmente.

L'albédo est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchie par la surface d'un corps non lumineux. Tout corps réfléchit une partie de l'énergie solaire qu'il reçoit. Plus un corps est clair et plus il est réfléchissant : son albédo est fort. À l'inverse, un corps sombre absorbe davantage les rayons du Soleil : son albédo est faible.

La valeur de l'albédo est comprise entre 0 et 1. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont les nuages, les surfaces de neige et de glace et les aérosols. Par exemple, l'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchie par ce type de matière.

En revanche l'albédo des arbres et de la végétation en général est faible.



Lorsque l'albédo est fort, non seulement le soleil chauffe la terre, mais l'air alentour se réchauffe plus vite et le sol se réchauffe une deuxième fois.

L'absence de végétation entraîne une rétroaction positive pour l'énergie solaire, mais négative pour le milieu, ce qui fait que le manque de végétation va faire évoluer le milieu vers le désert.

Le défaut de couvert végétal provoque une forte montée en température des sols : dans la région française de Bourgogne, des températures de 65 °C ont été mesurées dans les cinq premiers centimètres du sol. La montée en température des sols fait monter le pH. Les éléments capables de fabriquer des bases se solubilisent, et les bases actives deviennent bactéricides.

La remontée de ph affecte négativement la vie microbienne aérobie ; elle affecte aussi la matière organique carbonée et le sol qui vont perdre beaucoup de carbone qui va se dégager dans l'atmosphère sous forme de méthane (CH4) ; enfin la carence en microorganismes aérobie va faire que les éléments minéraux de la roche-mère qui ont été solubilisés ne peuvent plus arriver aux plantes, ce qui crée des carences artificielles en éléments minéraux, comme le phosphore, la potasse, le calcium, le magnésium… nécessaires à la croissance des plantes.

L'effet des hautes températures peut être pire que celui de la sécheresse.[1]

L'augmentation du taux d'aridité de 0,54 à 0,7 est marquée par une phase de « perturbation du sol » caractérisée par de nombreux changements structurels et fonctionnels de l'écosystème :

– diminutions abruptes de la teneur du sol en carbone organique qui est un déterminant clé de la fertilité du sol ;
– baisse de l'azote total et des teneurs en argile des sols ;

– perte de la stabilité des agrégats ;

– moindre abondance relative des groupes fonctionnels fongiques ;

– réductions des nutriments du sol associées à la diminution des apports organiques d'origine végétale dans le sol, eux-mêmes déterminés par le déclin de la productivité végétale et par les réductions drastiques de la teneur en azote des feuilles survenant à une aridité de ~0,65 ;

– forte diminution de l'effet positif des couverts végétaux, là où le sol est nu, sur le carbone organique du sol ;

– réduction de l'abondance relative des champignons saprotrophes, qui sont des moteurs clés de la formation d'» îlots de fertilité « dans les zones arides. La réduction nette de la quantité et de la qualité des apports de carbone végétal dans le sol pourrait être aussi la conséquence des coûts excessifs nécessaires à l'extraction de l'eau et des nutriments pour maintenir un gain de carbone positif dans des conditions de plus en plus arides.

– déclins abrupts de l'abondance relative des champignons ectomycorhiziens qui entraîne des changements abrupts de la composition des communautés végétales et des cycles biogéochimiques du sol ;

– diminution de la fréquence des interactions positives entre plantes, pour lesquelles l'amélioration du sol est une composante fondamentale ;

– déclenchement d'une "réaction de Fenton" c'est-à-dire d'une "attaque chimique hyper oxydante" de la matière organique du fait de l'exposition des sols nus au rayonnement solaire.[2]

Pendant cette phase de perturbation du sol, la végétation passe de la prairie et de la savane à de zones arbustives clairsemées, qui sont mieux adaptées aux sols pauvres en nutriments et sablonneux.
La nouvelle végétation dominante est moins

1 Gérard Ducerf, « Agroécologie sécheresse et vie microbienne des sols » https://www.youtube.com/watch?v=z_5wA8m_Hul&t=34s

2 Christos D. Georgiou et al, 2015, « Evidence for photochemical production of reactive oxygen species in desert soils », Nature Communication. https://www.nature.com/articles/ncomms8100.pdf



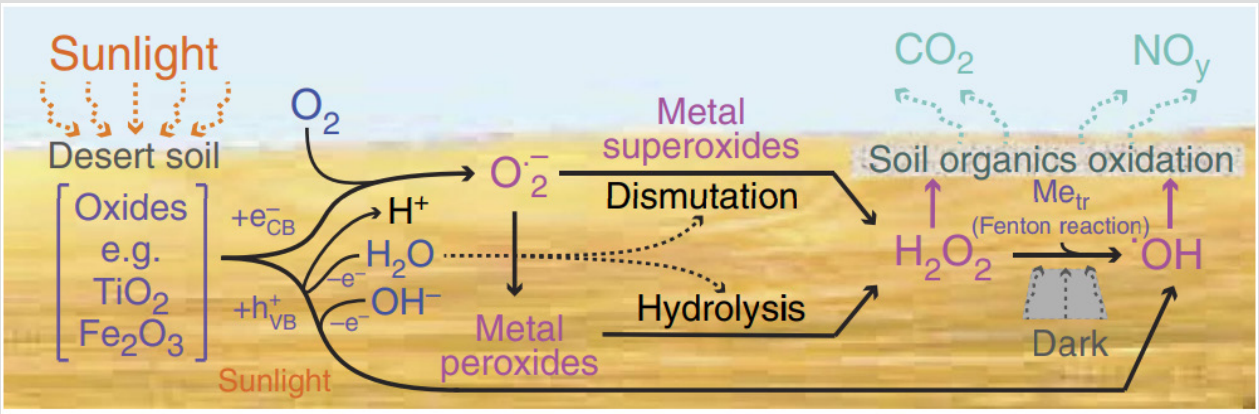
sensible aux fluctuations climatiques du fait de systèmes racinaires plus profonds que l'on trouve généralement chez les arbustes et qui les rendent moins sensibles aux sécheresses saisonnières.
Nous verrons plus loin que l'évolution vers la désertification est réversible, si on revégétalise, si on plante des arbres, s'il y a production d'humus et si l'on permet la captation de la moindre humidité. Le cycle de l'eau peut alors être remis en œuvre là où l'eau avait disparu.

RÉACTION DE FENTON

S'il n'est pas capté par les plantes, le soleil est le pire ennemi du sol et de la biologie.

Le rayonnement solaire sur une terre nue entraîne une « réaction de Fenton » qui est une réaction d'oxydation avancée consistant à amorcer des réactions de décomposition du peroxyde d'hydrogène (H2O2) par des sels métalliques afin de générer des espèces radicalaires (ou réactives) de l'oxygène (HO•, HO2, etc.). Dans la majorité des cas, on aboutit à la formation du radical hydroxyle HO qui est le deuxième oxydant le plus puissant présent dans la nature après le fluor.

MÉCANISME PHOTOCHIMIQUE DE L'ACTION OXYDANTE DES SOLS DÉSERTIQUES



Source : Christos D. Georgiou et al., 'Evidence for photochemical production of reactive oxygen species in desert soils', Nature Communication, May 2015.

QUAND ARROSER ET FERTILISER AFFAIBLIT LES PLANTES



« En maraîchage, l'eau est considérée comme un intrant comme un autre, au même titre que les fertilisants. Les légumes sont arrosés régulièrement et, du fait de cette attention quotidienne, ils développent assez peu leur capacité à explorer profondément le sol avec leurs racines.

Les plantes qui sont sous assistance hydrique ont une faible capacité à résister à des stress hydriques et aux chocs climatiques et il faut en conséquence les arroser très régulièrement pour pouvoir les tenir.

Dès que cette assistance est interrompue, les plantes flétrissent très vite. De plus, en fertilisant avec des engrais, on empêche le développement des mycorhizes et donc la possibilité d'une exploration ample du sol et de ses ressources hydriques (comme de ses ressources en nutriments acides aminés oligo-éléments ».

– Arthur Buresi

Ce mode de maraîchage permet de produire sur des sols morts ou moribonds, ou même sans sol.

L'agriculture "moderne" peut répondre à la mort des sols qu'elle a provoquée, en se passant de sols vivants. Il suffit d'amener aux légumes cultivés l'eau des éléments sous forme très soluble, du type ammonitrate ou de les nourrir d'une manière totalement artificielle avec des engrais liquides.

Mais en produisant de cette manière des légumes ou des céréales dont les racines n'ont pas eu besoin de pénétrer profondément dans une terre pleine de vie, ni de nouer des symbioses avec les champignons pour chercher les éléments minéraux, on obtient des plantes qui sont carencées en phosphore, en magnésium, en cuivre, en potasse, en acides aminés et en d'autres éléments indispensables du point de vue de l'équilibre nutritionnel et de la santé humaine.

Qui mangera des aliments carencés, aura des carences et aura de grandes chances de développer des maladies métaboliques et dégénératives.

Les acides aminés sont essentiels à la vie.

Sur les vingt acides aminés qui existent sur terre, le corps humain n'en fabrique que onze. Plus précisément, il fabrique à peu près tous les acides aminés, mais pas en nombre suffisant pour bien fonctionner et être en pleine santé. Il doit donc en trouver ailleurs, et c'est pour ça qu'on se nourrit.

Pour la plante la situation est identique. Les végétaux reçoivent les acides aminés qui leur manquent en établissant des symbioses avec les bactéries et les mycéliums. Les acides aminés jouent un rôle très important pour la plante puisqu'ils concourent à tous ses métabolismes, dans la constitution de ses protéines ou encore dans la synthèse des vitamines.

Des pratiques agricoles qui se passent de sols vivants privent les plantes de relations avec tous les mycéliums et les bactéries symbiotiques qui apportent les acides aminés à ces plantes. Les plantes vont se débrouiller, mais elles seront en carence, elles auront aussi moins de goût et l'être humain qui mange ces légumes sera lui-même en carence.

On constate que si une plante peut choisir sa nourriture, elle va vers les acides aminés et délaisse les fertilisants azotés. Elle ne les absorbe que si elle n'a pas d'autre choix.

En d'autres termes les fertilisants classiquement utilisés en maraîchage sont «*la malbouffe*» des plantes.

ACIDES AMINÉS ESSENTIELS ISSUS DE LA BIODIVERSITÉ DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE DANS LE SOL

Les acides aminés sont essentiels à la vie. Sur les vingt acides aminés qui existent sur terre, le corps humain n'en fabrique que onze. Plus précisément il fabrique à peu près tous les acides aminés, mais pas en nombre suffisant pour lui être utile. Il doit donc en trouver ailleurs et c'est pour ça qu'on se nourrit. Pour la plante la situation est identique.

Les végétaux reçoivent les acides aminés manquant par leur symbiose avec les bactéries et les mycéliums.

Des pratiques agricoles qui se passent de sols vivants et privent les plantes de relations avec tous les mycéliums symbions qui apportent les acides aminés à ces plantes.

Les plantes vont se débrouiller, mais elles seront en carence, elles auront aussi moins de goût et l'être humain qui mange ces légumes est lui-même en carence.

Acides aminés essentiels	Acides aminés essentiels sous condition	Acides aminés non essentiels
Histidine	Arginine	Alanine
Isoleucine	Asparagine	Aspartate
Leucine	Glutamine	Cystéine
Méthionine	Glycine	Glutamate
Phénylalanine	Proline	
Thréonine	Sérine	
Tryptophane	Tyrosine	
Lysine		
Valine		

RECRÉER DES VARIÉTÉS VÉGÉTALES RÉSISTANTES AUX MALADIES ET TOLÉRANTES AU STRESS HYDRIQUE



Pascal Poot

Le maraîcher atypique Pascal Poot a montré qu'il possible de recréer des variétés végétales cultivées résistantes aux maladies et tolérantes au stress hydrique en les déshabituant de la surprotection coutumière en maraîchage conventionnel[1].

« Je me suis toujours dit que si les plantes qu'on appelle mauvaises herbes sont si résistantes aujourd'hui c'est justement parce que personne ne s'en est occupé depuis des générations et des générations.

Tout le monde essaye de cultiver les légumes en les protégeant le plus possible, moi au contraire j'essaye de les encourager à se défendre eux-mêmes.

J'ai commencé à planter des tomates sur ce terrain plein de cailloux il y a une vingtaine d'années, à l'époque il n'y avait pas une goutte d'eau.

Tout le monde pense que si on fait ça toutes les plantes meurent, mais ce n'est pas vrai. En fait, presque tous les plants survivent.
Par contre on obtient de toutes petites tomates, ridicules. Il faut récolter les graines du fruit et les semer l'année suivante. Là on commence à voir de vraies tomates, on peut en avoir 1 ou 2 kg par plant.

Et si on attend encore un an ou deux, alors là c'est formidable.

Au début on m'a pris pour un fou, mais au bout d'un moment, les voisins ont vu que j'avais plus de tomates qu'eux, et jamais de mildiou, en plus, alors les gens ont commencé à parler et des chercheurs sont venus me voir. »

– Pascal Poot



Échantillon de la Production de Pascal Poot

1 Cf. Jean-Luc Galabert, « Recréer des variétés végétales résistantes aux maladies et tolérantes aux stress », La Vie ReBelle, avril 2022. https://lavierebelle.org/comment-recreer-des-varietes?lang=fr

L'IRRIGATION PAR L'EAU DES NAPPES PHRÉATIQUES N'EST PAS LA SOLUTION

Dans la nature, il ne tombe sur le sol que de l'eau de pluie qui est une eau distillée. L'irrigation à partir d'eau de nappe chargée de minéraux, de calcium, de sodium, de magnésium selon les roches du sous-sol salinise le sol qui devient à terme impropre à la culture. (Un litre d'eau de nappe contient en moyenne de 750 à 1000 mg de sels minéraux en France).

On salinise à l'heure actuelle huit millions d'hectares de terre par an à cause de l'irrigation.

L'eau d'irrigation provenant des nappes phréatiques est un facteur de destruction des sols vivants d'autant plus important si elle sert à arroser un sol chaud.

Quand on met de l'eau sur un sol chaud, on provoque une minéralisation de la matière organique et on la fait disparaître.

Dans les pays tropicaux, la nature se défend bien, car elle a une végétation extraordinairement puissante qui met la terre à l'ombre et la protège de la montée en température et qui fait que la minéralisation est lente.

Dans une forêt équatoriale en bon état, il fait à l'ombre une température de 20 degrés. Mais dès que l'on coupe une forêt pour en faire un champ de soja, la température monte à 40, 45 degrés et les sols cuisent.

Le pompage de l'eau de nappe à d'autres effets délétères :

« Le surpompage est massif et, ayant doublé ces dernières années, les nappes s'appauvrissent partout.

— Dans le nord de l'Inde, au Pendjab, l'une des grandes zones de production agricole en Asie, les paysans se désolent : les nappes phréatiques, sans cesse soumises à un pompage excessif, ont baissé de 12, 18, voire 30 m en une génération.

— Au Bangladesh, on a tellement pompé dans les nappes que de nouveaux polluants sont arrivés et l'eau s'est chargée en arsenic et dans ce pays les contaminations sont chroniques et un décès sur cinq attribuable à ces contaminations.



Une nappe c'est de l'eau qui va s'infiltrer, se purifier et va réussir à alimenter les eaux de surface proches. Quand on prélève dans la nappe, c'est la rivière qui ne sera plus alimentée derrière.

— Le château d'eau de la Californie, la Sierra Nevada, n'a plus une seule goutte d'eau qui traverse ses cours d'eau. Il n'y a plus rien dans les réseaux hydrographiques. Tous ces réseaux hydrographiques se rejoignent dans une énorme vallée centrale où tout a été construit pour faire de l'agriculture.

L'État de Californie a été pensé à tous les niveaux pour nourrir l'assiette de l'Américain moyen : 80 % de son assiette sont issus de la Californie (les œufs, le lait, la viande, les amandes, le raisin, les fruits…). Puisqu'il n'y a plus assez d'eau, on fore de plus en plus loin, de plus en plus profond.

Certains petits propriétaires terriens n'ont plus du tout d'eau, parce que plus vous forez loin, plus ceux qui ont un petit pompage avec un système non industrialisé n'ont plus accès à ce niveau de la nappe.

Tout cela génère des états catastrophiques : on a carrément des routes qui s'affaissent, de 30 cm par an en ce moment, parce qu'on soutire beaucoup trop dans les nappes et qu'il n'y a aucune limitation à l'agriculture. »

– Emma Haziza, entretien avec Julien Devaureix

Au constat dressé par Emma Haziza on peut ajouter que dans des régions où l'on pompe et assèche les nappes en dessous du niveau de la mer, l'eau douce qui a été extraite est remplacée par des eaux saumâtres.

Les agriculteurs qui pompent de l'eau à des profondeurs excessives se défendent en se disant que l'eau salée ne va pas venir ou que les nappes se rechargeront suffisamment lors des saisons pluvieuses.

Mais l'expérience montre qu'ils ont tort. C'est ce que disaient les Espagnols il y a une trentaine d'années, et maintenant il y a des régions entières en Espagne où l'eau des nappes est saumâtre.

En ayant pompé aussi profondément, de vieux arbres pluricentenaires qui étaient en connexion avec des nappes lorsqu'elles étaient entre 40 et 60 mètres de profondeur, ne trouvent plus d'eau aujourd'hui, car il faudrait que leurs racines descendent à 110-120 mètres.

On a donc des arbres vénérables extraordinaires qui sont en train de mourir simplement parce qu'on va pomper trop et loin.

Il ne s'agit pas de dire qu'il ne faut aucunement se servir dans les nappes phréatiques, mais il faut le faire avec parcimonie, il faut utiliser cette eau avec intelligence et ne prélever que dans la mesure où on permet à l'eau des précipitations de s'infiltrer dans les sols et de recharger les aquifères et où l'on ménage des zones humides.

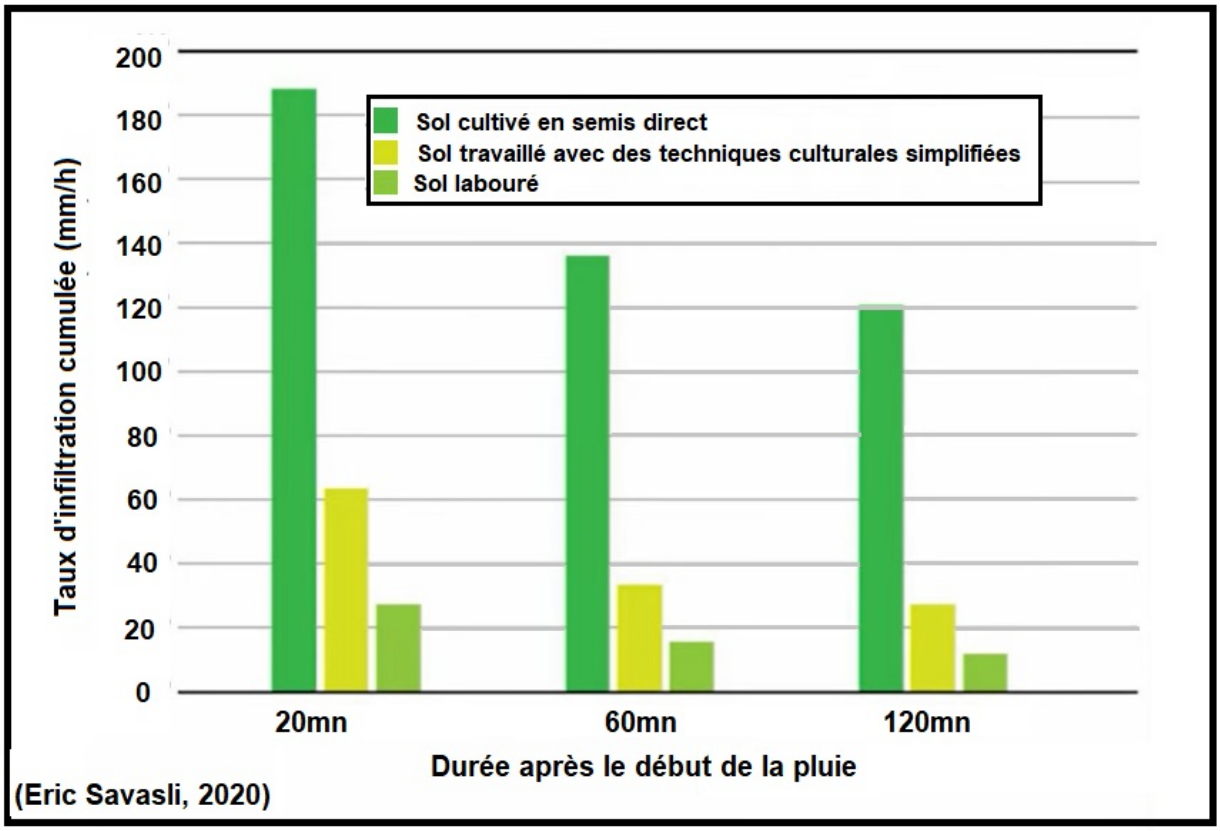
La possibilité de prélever de l'eau pour arroser doit être conditionnée par la prise de mesure comme celle de planter des arbres permettant de recharger les aquifères. Tout prélèvement ne respectant ce principe devrait être interdit.

On notera par ailleurs que la nécessité d'irriguer ou la possibilité de se passer d'irrigation est largement dépendant du mode de conduite des cultures qui vont conditionner la capacité des sols à capturer l'eau et à augmenter et maintenir ce que les agronomes appellent une « *réserve d'eau utile* » à disposition des plantes.

Le maintien d'une couverture végétale permanente de sols favorise l'infiltration de l'eau. Le diagramme ci-dessous montre que le taux d'infiltration d'un sol cultivé en semis direct est presque trois fois supérieur à celui d'un sol travaillé avec des techniques culturales simplifiées qui est lui-même deux fois supérieur à celui d'un sol labouré. Cet écart reste constant après deux heures de pluie.

Lorsqu'il pleut, un sol non labouré et cultivé en semis direct permet donc l'infiltration de six fois plus d'eau qu'un sol cultivé selon les techniques conventionnelles, comme le labour des sols.

Un sol labouré ou travaillé superficiellement arrive rapidement à saturation lorsque survient un orage ce qui entraîne un ruissellement important et accroît aussi bien l'érosion que le dessèchement rapide des sols après la pluie, que les risques d'inondation.



L'UTILISATION DES EAUX DE NAPPES FOSSILES CONCOURT À L'EFFET DE SERRE ET À L'ÉLÉVATION DU NIVEAU DES OCÉANS



Les premiers captages d'eau souterraine par puits ou par galeries sont très anciens. Les Chinois pratiquent la technique des forages depuis plusieurs millénaires, certains forages avec des tiges de bambou assemblées atteignant 1500 m de profondeur. Le plus ancien ouvrage connu en Égypte a été creusé il y a quatre mille ans.

Toutefois, ce n'est qu'avec la mise au point de nouveaux systèmes de forage au milieu du XIXe siècle que l'homme fore de plus en plus systématiquement et profondément pour extraire du pétrole ou de l'eau.

Depuis, de nombreuses nappes fossiles sont exploitées sur tous les continents. Cette eau de nappe souterraine peut avoir mis des dizaines de milliers ou des millions d'années à se constituer.

Si on prend l'exemple du Sahara, il y a 6000 ans cette région était encore luxuriante, ce n'était pas du tout un désert, l'eau s'infiltrait grâce aux racines des plantes et à la porosité du sol, si bien qu'au fil des millénaires antérieurs à la désertification du Sahara, une nappe gigantesque s'est formée dans son sous-sol.

Les réserves aquifères du Sahara septentrional sont évaluées à 31 000 milliards de mètres cubes et s'étendent sur une surface de 600 000 km², soit celle d'un pays comme la France. C'est l'un des plus grands systèmes aquifères au monde.

La nappe fossile s'étend sur trois pays : Algérie, Tunisie et Libye, en continu de l'Atlas saharien Nord jusqu'au Tassili du Hoggar au Sud. Grâce au carbone 14, l'âge de ces eaux fossiles a pu être déterminé. Elles ont au moins 10 000 ans et atteignent parfois 32 000 ans. Mais si cette ressource paraît importante, tout comme pour le pétrole, son exploitation sera limitée dans le temps, car cet aquifère n'est pas renouvelable. Dans une cinquantaine d'années, la ressource pourrait être épuisée.



Station de pompage de l'aquifère de Disi, en Jordanie, inaugurée en 2013. L'eau fossile est destinée à satisfaire entre et 20 et 25 % des besoins de la Jordanie. (AFP/Khalil Mazraawi)

L'aquifère que la Jordanie partage avec l'Arabie Saoudite a intensément été pompé depuis 1970. Cette extraction d'eau de nappe fossile à même permis de cultiver des zones jusque là désertique.

Selon l'Institut de recherche pour le développement, depuis les années 1960, les prélèvements n'ont cessé d'augmenter afin de satisfaire la demande. Les pompages sont passés de 0,5 km3 en 1960 à 2,75 km3 en 2010.



Pipeline de l'aquifère de Disi (Halcrow.com)

L'assèchement de cette nappe fossile non rechargeable par le cycle naturel de l'eau est le destin de cet aquifère à brève échéance.

Comme on le voit sur cette étonnante photo, le pompage d'aquifères fossile permet donc de cultiver en plein désert. Mais cette prouesse agronomique n'est pas sans revers.

Faute de paysage qui permette à cette eau prélevée dans le sous-sol de s'infiltrer de nouveau dans le sol, des volumes d'eau considérables retournent quasi immédiatement dans l'atmosphère.

Certaines études avancent que cet apport représenterait 30 à 40 % de l'élévation du niveau des océans[1].

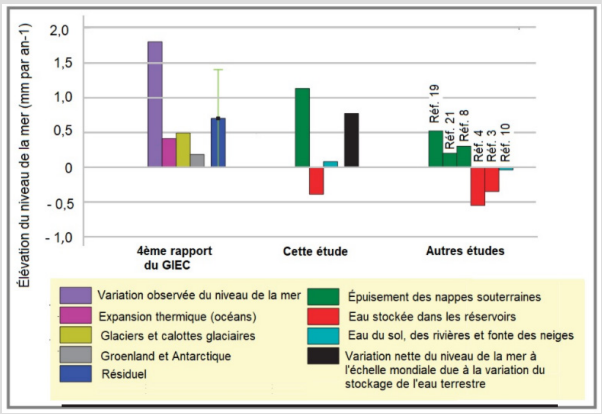
Pour Yadu N. & al., (2012), la dilatation thermique des océans, la fonte des glaciers et la perte des masses de glace du Groenland et de l'Antarctique qui sont généralement considérées comme les principaux facteurs d'élévation du niveau des océans n'expliquent pas entièrement l'élévation du niveau de la mer observée.

Yadu N. & al. constatent qu'ensemble, l'utilisation de l'eau des nappes souterraines, la rétention artificielle de l'eau dans les réservoirs et la perte d'eau dans les bassins fermés ont contribué à une élévation du niveau de la mer d'environ 0,77 mm par an entre 1961 et 2003, soit environ 42 % de l'élévation du niveau de la mer observée.

Nous notons que, parmi ces composantes, l'utilisation non durable des eaux de nappes souterraines représente la contribution la plus importante.



Vue aérienne de zone irriguée par aquifère en Arabie Saoudite



Estimations des diverses contributions à la variation observée du niveau de la mer.
Source : Yadu N. & al., (2012)

Les estimations du 4e rapport du GIEC et celles de la présente étude portent sur la période 1961-2003, tandis que les estimations des autres études portent sur la dernière moitié du XXe siècle, à l'exception de Wada et al. (1960-2000).

La marge d'erreur indique la plage d'incertitude résiduelle du bilan du niveau de la mer estimé par le 4e rapport du GIEC.

Notez que les résultats de Chao B.F. et al. (2008) incluent la perte par infiltration des réservoirs, mais que ceux de Lettenmaier, D. & Milly (2009) n'incluent pas cette perte.

1 Yadu N. Pokhre & al., 'Model estimates of sea-level change due to anthropogenic impacts on terrestrial water storage', Nature Geoscience, Vol. 5, June 2012, https://water.egr.msu.edu/docs/2014/10/Pokhrel_2012-NatureGeo.pdf

Yadu N. Pokhrel, Naota Hanasaki, Pat J-F. Yeh, Tomohito J. Yamada, Shinjiro Kanae and Taikan Oki; 'Model estimates of sea-level change due to anthropogenic impacts on terrestrial water storage', Nature Geoscience, Vol 5, June 2012. https://water.egr.msu.edu/docs/2014/10/Pokhrel_2012-NatureGeo.pdf
Chao, B. F., Wu, Y. H. & Li, Y. S. Chao, B. F., Wu, Y. H. & Li, Y. S.. 'Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level'. Science 320, (2008).
Lettenmaier, D. & Milly, P. Land waters and sea level. Nature Geosci. 2, 452-454 (2009).

Pour l'hydrologue Emma Haziza, l'extraction et l'utilisation irraisonnable de l'eau des aquifères fossile est un facteur majeur de catastrophe :

« Au niveau de la couronne atmosphérique qui compose notre atmosphère principalement, l'eau représente un septième de la mer Caspienne, c'est-à-dire presque rien, de mémoire c'est 14 000 km³.

En réalité la quantité de vapeur d'eau est infime sur la planète. Et sa modification va avoir des conséquences dramatiques. […]

Le pompage des nappes souterraines et son utilisation pour l'irrigation font qu'on augmente le pourcentage de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Si on augmente le pourcentage de vapeur d'eau dans l'atmosphère, le pourcentage de vapeur qui est en inertie, celui qui ne peut pas bouger, celui qui de toutes les façons est constant en permanence, peu importe le cycle de l'eau, on augmente automatiquement l'effet de serre, on augmente la température et on augmente l'évaporation.

Du coup l'eau condense deux fois plus vite, parce qu'il y a beaucoup plus d'évaporation et elle va précipiter deux fois plus rapidement.

La NASA vient de montrer qu'il y avait des quantités de vapeur d'eau plus en plus importantes et pourtant on met ce phénomène de côté, et on considère que l'unique solution au changement climatique réside dans la décarbonation.

Certes, il faut décarboner, et réduire les gaz à effet de serre comme le CO_2 qui en inertie une fois qu'il a été émis, c'est trop tard il reste dans l'atmosphère un certain nombre d'années. Mais la question de l'eau à côté reste en suspens.

Je pose donc la question : est-ce que le CO_2 n'est pas l'arbre qui cache la forêt ? Est-ce que le vrai problème, majeur et massif que presque personne ne prend en compte n'est pas celui du cycle de l'eau ?

Il y a deux responsables du dérèglement du cycle de l'eau : les villes et les campagnes. Les pratiques agricoles dominantes ont complètement détruit les sols et leur porosité. Les sols ne sont plus du tout capables d'absorber l'eau.

L'urbanisation quant à elle a complètement imperméabilisé les sols. On n'a plus qu'un grand cycle de l'eau qui ruisselle et s'évapore, mais ne peut pas s'infiltrer. L'eau finit deux fois plus vite dans les cours d'eau et à l'exutoire et un autre cycle commence.

Pourquoi on n'en parle pas. On dispose de chiffres, car on a calculé la part de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Toutes les dernières études le confirment, toutes les données semblent se rejoindre : on augmente la part de vapeur d'eau dans la partie basse de l'atmosphère et on semble perdre de la vapeur d'eau en haute atmosphère.

C'est terrible parce qu'en réalité, on est en train de perdre notre atmosphère qui se rétracte et rétrécit, et nous sommes là-dedans. On est comme dans une espèce de cocotte minute et on ne le voit pas venir, parce qu'on a l'impression que ça ne va pas nous concerner.

Or toutes les vagues de chaleur qu'on a générées entraînent deux choses : des canicules et des incendies qu'on ne sait plus maîtriser. Nos organismes ne sont pas du tout préparés aux canicules à venir et nos systèmes de climatisation atteignent leurs limites. »

– E. Haziza *Crise de l'eau, planète Terre invivable ?*[1]

LES PROBLÉMATIQUES DU MANQUE ET DE L'EXCÈS D'EAU DOIVENT ÊTRE TRAITÉES CONJOINTEMENT

Une des caractéristiques majeures du dérèglement climatique en cours est la fréquence de plus en plus élevée de phénomènes extrêmes et l'alternance de période de sécheresse et d'inondation.

Si l'aridité est un problème, l'excès d'eau en est un autre. Un sol hydromorphe (c.-à-d. saturé d'eau) ne permet le développement que de très peu de plantes.

Pour Gérard Ducerf, les premiers signes de la désertification, sont les inondations. Expert en plantes bio-indicatrices, il a constaté qu'une caractéristique nouvelle du contexte actuel dans certaines régions tient à la présence simultanée de plantes bio-indicatrices de l'aridité et de l'hydromorphie.

PROBLÉMATIQUE DE L'HYDROMORPHISME

L'hydromorphie se définit comme un excès d'eau dans le sol. Cet excès chasse l'air ; il n'y a plus

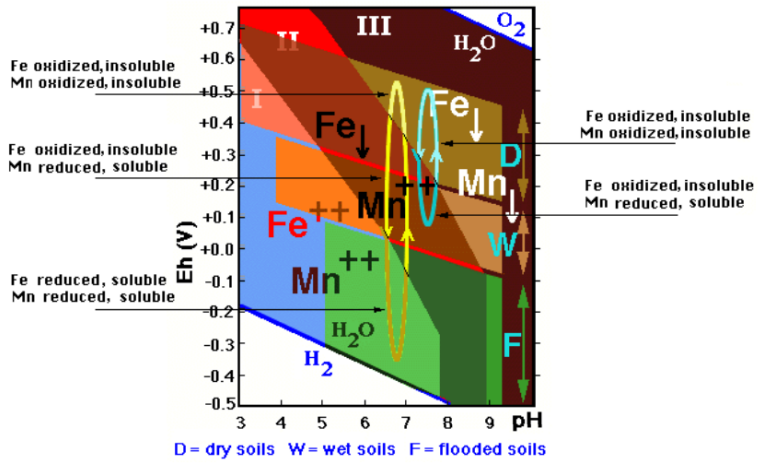
1 Crise de l'eau, planète Terre invivable ? Entretien avec Emma Haziza — https://www.youtube.com/watch?v=5ysUySSNW3M

d'oxygène dans le sol et les microorganismes anaérobies prennent le relais des microorganismes aérobies qui disparaissent par manque d'air. Ce phénomène est courant dans les zones humides ou très arrosées, ou encore lorsque l'irrigation est excessive.

Il existe aussi des phénomènes que Gérard Ducerf qualifie d'« *hydromorphismes induits* » qui ne sont pas forcement dûs à l'eau, mais qui ont les mêmes conséquences sur les microorganismes, la matière organique et les éléments fertilisants des sols.

Ces « *hydromorphismes induits* » sont provoqués par les pratiques agricoles.

Du fait que l'on est dans des périodes très sèches et très chaudes, on a tendance à travailler le sol quand il est mouillé, on attend qu'il pleuve pour labourer, semer et travailler le sol. Or, chaque fois qu'on travaille un sol humide, on le fait entrer dans ce phénomène d'hydromorphisme. Le sol travaillé par temps humide éclate, l'eau colle, chasse l'air et l'eau remonte, laissant du béton.



Une autre manière d'induire le phénomène d'hydromorphisme consiste à enfouir des matières organiques à plus de cinq centimètres de profondeur.

En faisant cela, on met de la matière organique en décomposition en situation anaérobie et cela va provoquer ces phénomènes d'hydromorphisme. La création de semelles de labour, le piétinement du sol par le bétail suite au surpâturage (surtout en périodes de pluie) aboutissent au même résultat.

Enfin, le choix de contrer la remontée de pH à cause de l'augmentation des températures due au réchauffement climatique par des amendements calciques crée aussi des phénomènes d'hydromorphisme, car l'amendement calcique va immédiatement devenir soluble et va tuer totalement la vie microbienne aérobie du sol. Plus cet amendement calcique sera fin, plus il sera soluble et bactéricide. Les amendements calciques ne font pas remonter le pH d'un sol. Leur usage pour cette fonction ne sert à rien.

Un amendement calcique est seulement utile si le sol présente une carence en calcium ou si on veut faire une culture exigeante en calcium.

Le chaulage avec des moutures fines est aussi bactéricide et nuisible. L'apport de calcium doit se faire sous des formes non nocives comme des coquilles d'huîtres ou du carbonate de calcium de carrière juste concassés, car se sont les bactéries qui vont le solubiliser dans des doses et sous une forme appropriée pour le rendre disponible aux plantes via les champignons.

L'hydromorphisme se définit donc par l'asphyxie du sol qui peut être aussi bien liée à la saturation du sol en eau qu'à l'impossibilité pour l'eau de pénétrer dans le sol.

L'anaérobiose est un synonyme d'hydromorphisme. L'anaérobiose perturbe la vie biologique du sol. Quand il y a hydromorphisme, la vie microbienne aérobie disparaît et les bactéries anaérobies prennent le relais et le sol passe en réduction.

Cette réduction a plusieurs conséquences :

– Tous les microorganismes de la planète ont besoin d'oxygène. Les microorganismes aérobies ont besoin de l'oxygène de l'air, mais tous les microorganismes anaérobies sont tués par cette forme d'oxygène.

Les bactéries anaérobies vont aller chercher l'oxygène ailleurs notamment sur l'azote (NO_3) et rétrograder pour cela l'azote sous forme de nitrate (NO_3—) en nitrite (NO_2—) ou en monoxyde d'azote (NO) qui va se dégager dans l'atmosphère sous forme de gaz à effet de serre.

De plus, quand les microorganismes anaérobies estiment qu'ils ne trouvent pas assez d'oxygène dans l'azote, ils vont chercher les atomes d'oxygène sur l'argile qui est un silicate d'alumine hydraté, molécule qui contient de

la silice, de l'aluminium, de l'hydrogène et de l'oxygène.

Or lorsqu'un atome d'oxygène est prélevé sur l'argile, tous les autres atomes se détachent, ce qui va créer une couche imperméable dans le sol qui empêche la porosité du sol et la communication entre couche superficielle et couches profondes du sol.

Quand il pleuvra, l'eau des précipitations ne pouvant plus s'infiltrer va ruisseler et lessiver les sols de leurs nutriments, et la nappe ne va plus pouvoir être alimentée. Et, en période de sécheresse, l'eau des nappes phréatiques, ne va plus pouvoir remonter va la surface. Le phosphore de la roche-mère et la potasse ne vont plus pouvoir remonter vers la surface. L'aluminium va aussi bloquer.

– Les nutriments se dégradent en anaérobiose par le seul travail des bactéries anaérobies. Ils deviennent improductifs, toxiques.

– Quand ils ne sont plus contrôlés par les microorganismes aérobies différents éléments du tableau de Mendeleïev génèrent des toxicités insidieuses extrêmes. Les ions FE_2+ évoluent en ions ferriques (Fe_3+) ; les ions d'aluminium (Al_2+) en ions $Al\ _3+$, les ions nitrates ($NO_3—$) en ions nitrites ($NO_2—$) qui se transmettent à toute la chaîne alimentaire dont l'ingestion est la cause majeure des maladies de dégénérescence nerveuse et des intoxications aux métaux lourds.

– Les racines des plantes sont atrophiées, courbées.

– Du méthane, dont l'effet de serre est au moins 21 fois supérieur à celui du CO_2, est dégagé.

L'autre effet pervers de ces hydromorphismes et compactages sur la santé est chimique : la disparition des bactéries de surface laisse la place aux bactéries qui sont non seulement contaminantes pour l'homme, mais aussi provoquent des réactions en chaîne toxiques.

Les fermentations butyriques, comme la transformation des nitrates en nitrites, génèrent des ions métalliques hautement cancérigènes et des perturbateurs endocriniens qui se diffusent dans toute la chaîne alimentaire, de la plante a l'animal qui la mange.

Et sur le sol ?

Les nitrites et leurs métaux lourds, en tuant la vie de surface qui n'est pas apte à vivre à leur contact, empêchent la dégradation détritiphage, rompent les complexes organominéraux et argilohumiques, jusqu'à la phase ultime et irréversible, que l'on vit aujourd'hui dans de nombreux sols des grandes cultures françaises : la pulvérisation des argiles.





L'ALTERNANCE DU MANQUE ET DE L'EXCÈS N'EST PAS UN PARADOXE

Des régions de plus en plus nombreuses souffrent à la fois d'excès et de manque d'eau.

Ainsi peut-on voir pousser sur les mêmes parcelles, des plantes adventices bio-indicatrices d'un excès d'eau et d'autres plantes bio-indicatrices d'une désertification à trente centimètres l'une de l'autre.

On peut voir dans ce phénomène un paradoxe. Mais ce paradoxe n'est qu'apparent.

Ce qui nous manque, en fait c'est un régulateur de l'eau, un régulateur de ses excès et de ses déficits.

Ce régulateur nous le connaissons, mais nous le bannissons. L'urbanisation, la déforestation, l'agriculture conventionnelle commencent par bannir les plantes en général et les arbres en particulier.

Seuls le reboisement, l'embocagement de parcelles cultivées, l'extension des pratiques agroforestières et la végétalisation des zones urbaines peuvent réguler l'eau et la versatilité des précipitations. Les plantes sont les gestionnaires des cycles de l'eau.



4| L'EAU ET LE CLIMAT

OÙ L'ON VERRA QUE LE PRINCIPAL GAZ À EFFET DE SERRE N'EST PAS LE CO2, MAIS LA VAPEUR D'EAU, ET QUE RESTAURER LES CYCLES DE L'EAU PERTURBÉS POURRAIT ÊTRE UN OUTIL MAJEUR À LA PORTÉE DE L'HUMANITÉ POUR LUTTER CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE.



L'EAU EST-ELLE LA GRANDE OUBLIÉE DE L'ANALYSE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE SES CAUSES ?

Selon l'hydrologue Emma Haziza, l'eau est un facteur essentiel négligé dans l'analyse des bouleversements climatiques en cours :

> *« On pense climat en regardant la tête en haut, or il faut penser climat en regardant en bas. Le sol est essentiel, on n'a plus de matière organique dans nos sols, on les a mis à nu pour avoir des engins puissants.*
> *Non seulement ce sont des sols vulnérables aux sécheresses, mais aussi aux inondations, car toutes les matières en suspension partent lors des pluies et se déversent en aval.*
> *Le sol est essentiel, or on est capable de faire du sol qui conserve l'eau et on l'oublie.*
> *Mais je rappelle que le premier gaz à effet de serre au monde, c'est l'eau : c'est ce qui permet à la Terre de ne pas ressembler à la Lune et donc à l'humain de survivre.*
> *La vapeur d'eau contribue pour 60 % à l'effet de serre planétaire, contribution qui monte jusqu'à 90 % si l'on considère aussi les nuages.*
> *Le cycle de l'eau est essentiel. J'ai l'impression qu'on regarde trop ailleurs et qu'on se trompe complètement de débat. Il faut regarder l'ensemble, il faut regarder où sont les vrais problèmes et prendre de vraies décisions, parce que c'est urgent.*
> *On est en train de changer de système.*
> *Ce qu'il nous manque, c'est l'audace ».*
>
> – *Emma Haziza*, Entretien avec Julien Devaureix *(Émission Sismique)*

Emma Haziza n'est pas la seule scientifique à soutenir que l'eau et ses cycles sont les paramètres oubliés de la réflexion sur le changement climatique. Ce constat est partagé par bon nombre d'hydrologues.

En 2007, l'hydrologue slovaque Michal Kravčík et ses collègues Jan Pokorný, Ing. Juraj Kohutiar, Ing. Martin Ková et Eugen Tóth ont publié un essai stimulant intitulé *Water for the Recovery of Climate — A New Water Paradigm*, qui est un plaidoyer pour réévaluer le rôle de la perturbation des cycles de l'eau dans les bouleversements climatiques en cours qui menacent les formes de vie actuelles.

Ces chercheurs promeuvent un changement de regard et de relation à l'eau. Pour Michal Kravčík et ses collègues, le paradigme actuel de l'eau qu'ils appellent malicieusement « *le paradigme ancien* », ne permet pas de formuler correctement les problèmes.

Penser et agir en restant dans le paradigme qui a généré les difficultés auxquelles l'humanité est confrontée — augmentation des températures locales et globales, recrudescence des épisodes extrêmes d'inondations, sécheresses, désertification… — ne saurait leur apporter de solutions valables.

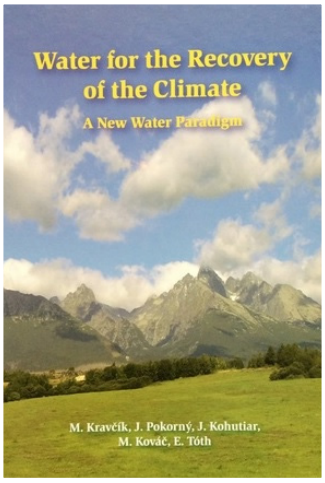
Ce faisant, ces hydrologues reprennent la maxime prêtée à Albert Einstein :

> *« Nous ne pouvons pas résoudre nos problèmes avec la même pensée que nous avions quand nous les avons créés. »*

Pour Michal Kravčík et les co-auteurs de *Water for the Recovery of Climate – A New Water Paradigm*:

> *'Une approche plus sensible que celle de la pure maîtrise est nécessaire. Les limites et les échecs et plus largement l'illusion de la maîtrise de l'eau implique de construire une nouvelle relation à l'eau et de formuler un nouveau paradigme de l'eau pour offrir des solutions durables à certaines des questions brûlantes relatives aux ressources en eau et à la circulation de l'eau. Il s'agit de relier des connaissances anciennes et plus récentes et d'en tirer les conséquences logiques.'*

Pour le groupe de chercheurs qui promeut ce nouveau paradigme, la perturbation des cycles de l'eau pourrait même être un facteur de perturbation climatique plus important que l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), protoxyde d'azote (N_2O), hydrofluorocarbones… présentés comme les principaux gaz à effet de serre.



De fait, l'importance de l'eau en matière de régulation climatique est méconnue, incomprise et encore moins médiatisée.

Or, non seulement, l'eau sous forme de vapeur est de loin le premier gaz à effet de serre qui est d'abord un effet protecteur, mais l'eau est en même temps la principale substance refroidissante et climatisante du système terre.

Il est donc pour le moins étonnant que la fonction des cycles de l'eau dans l'équilibre climatique et les conséquences de leur perturbation par les activités humaines soient si peu prises en compte dans les rapports du GIEC.

« Étant donné que la circulation de l'eau est très dynamique et complexe, l'eau qui est pourtant quantitativement le principal gaz à effet de serre a cependant été fortement négligée dans ces modèles [du GIEC]. L'eau est considérée comme un composant stable de l'atmosphère.

Les causes des changements dans le régime hydrique d'un pays sont difficiles à démontrer sans équivoque, car elles impliquent un complexe d'innombrables processus mutuellement liés. […]

– Michal Kravcík & al, 2007. Water for the Recovery of the Climate, A New Water Paradigm

"Avec d'autres gaz produits par l'homme, comme le méthane, le dioxyde de carbone a mauvaise presse depuis de nombreuses années et est uniformément cité comme la cause principale de l'effet de serre.

C'est tout simplement faux. Si l'augmentation du dioxyde de carbone peut être à l'origine d'un effet de serre accru, et donc du réchauffement climatique, le rôle de la molécule la plus vitale de notre atmosphère — l'eau — est rarement évoqué.

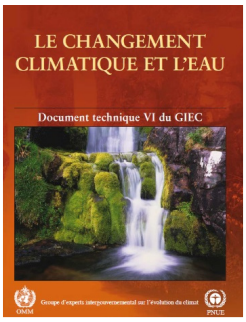
En effet, l'eau est à peine mentionnée dans les centaines de pages du rapport 2001 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat"

—Ahilleas Maurellis and Jonathan Tennyson, 2003. Climatic Effects of Water Vapour

L'attention des chercheurs associés au GIEC s'est en fait jusqu'à présent concentrée sur l'impact des changements climatiques sur le cycle de l'eau et sur la "*crise de l'eau*" qui en résulte, mais la question du rôle potentiel de la perturbation du cycle de l'eau comme agent du changement climatique n'a pas été posée.

Le *Document technique VI* du GIEC, publié en 2007 intitulé "*Le changement climatique et l'eau*" est introduit par le constat suivant :

"Le réchauffement observé pendant plusieurs décennies a été relié aux changements survenus dans le cycle hydrologique à grande échelle, notamment : l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, la modification de la configuration, de l'intensité et des extrêmes des précipitations, la diminution de la couverture neigeuse et la fonte des glaces accrue, ainsi que la modification de l'humidité du sol et du ruissellement."



Les rapporteurs de cette synthèse notent donc la corrélation étroite entre changement climatique et perturbation des cycles hydrologiques.

Mais tout le développement du rapport consiste à énumérer les conséquences catastrophiques du réchauffement global sur les ressources en eaux et le régime des pluies, et la recrudescence d'épisodes extrêmes de sécheresses et d'inondations.

Le document est conclu par le constat de la pauvreté des moyens consacrés à la problématique de l'eau dans un contexte où la disponibilité de cette ressource vitale est menacée.

"Il existe des lacunes en termes d'observation et de besoins de recherche liés au changement climatique et à l'eau. Les données d'observation et l'accès aux données sont des conditions préalables à la gestion adaptative, et pourtant bien des réseaux d'observation sont en voie de disparition.

Il est nécessaire d'approfondir la compréhension et d'améliorer la modélisation des changements climatiques liés au cycle hydrologique à des échelles pertinentes pour une prise de décision.

Les informations relatives aux incidences du changement climatique sur l'eau ne sont pas appropriées, surtout en ce qui concerne la qualité de l'eau, les écosystèmes aquatiques et les eaux souterraines, notamment dans leurs dimensions socioéconomiques.

Pour finir, les outils actuels ne sont pas adaptés à une évaluation intégrée des possibilités d'adaptation et d'atténuation dans les multiples secteurs qui dépendent de l'eau."

Plus récemment, dans le deuxième volet de son rapport, sur l'étude des impacts, de l'adaptation et de la vulnérabilité au changement climatique publié le 28 février 2022, le GIEC a dédié un chapitre aux menaces qui planent sur les écosystèmes hydrologiques et sur les mesures urgentes d'adaptation à ces perturbations du cycle de l'eau.

Mais, là encore la problématique de l'eau est traitée comme une conséquence des perturbations climatique qui implique des mesures d'adaptation. Les fonctions climatiques de l'eau ne sont pas abordées. On est loin du "*nouveau paradigme de l'eau*" souhaité par les hydrologues.

Cet état de fait est en partie dû à la domination des climatologues au sein du GIEC et à la faible représentation des experts de l'hydrosphère parmi les scientifiques de ce groupe.

Il est aussi lié à la complexité du phénomène et à la faiblesse des moyens alloués à la recherche dans ce domaine :

> *"De nombreux aspects de la molécule d'eau, apparemment simple, font qu'il est difficile de modéliser son effet sur notre climat.*
>
> *Contrairement à la plupart des autres gaz atmosphériques, la distribution de l'eau dans l'atmosphère varie fortement en fonction du temps, du lieu et de l'altitude.*
>
> *L'eau est également unique parmi les molécules atmosphériques, car elle change de phase aux températures terrestres.*
>
> *Cela signifie qu'elle peut transférer de l'énergie de sa forme gelée aux pôles à ses formes liquide et gazeuse dans l'atmosphère."*
>
> *—Ahilleas Maurellis and Jonathan Tennyson, 2003. Climatic Effects of Water Vapour*

Il faut en tout cas espérer que la théorie qui érige le CO_2 comme le principal agent du réchauffement climatique n'est pas le fait de scientifiques dont le comportement s'inspire de l'ivrogne qui cherche ses clefs au pied du réverbère, non parce qu'il les a perdues à cet endroit, mais parce qu'ici du moins, il y a de la lumière pour chercher.

Ce serait pour le moins dommageable, sinon catastrophique, si les objectifs de réduction de la concentration de CO_2, que le GIEC met en pleine lumière, ne sont pas ceux qui importent vraiment pour stabiliser l'effet de serre à un niveau compatible avec l'épanouissement de la vie sur terre.

Nous n'aurons aucune chance de comprendre pourquoi le fait de les avoir atteints ne résout nullement le problème initial, si tant est qu'il y ait encore des humains pour poser cette question.



Forêt et champs, le long de la rivière Snake dans le Minnesota, États-Unis.
(Photographie : Mark Godfrey)

IMPACTS DES MODES D'OCCUPATION ET DE GESTION DES SOLS SUR LE CYCLE DE L'EAU ET LE « RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE »



Effet érosif du ruissellement sur un sol nu drainant

Pour les concepteurs du nouveau paradigme de l'eau et pour d'autres experts de l'hydrologie et de la gestion agronomique des sols, l'impact de la mise à nu, du drainage et de l'artificialisation des sols est pire que celui des gaz à effet de serre.

« L'une des mesures de l'impact de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre est ce que l'on appelle l'effet de rayonnement, qui exprime une modification de l'équilibre entre le rayonnement entrant dans le système de l'atmosphère terrestre et le rayonnement sortant de ce système.

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, l'industrialisation mondiale a provoqué, par rapport à la période préindustrielle, un réchauffement avec des effets de rayonnement égaux à 1,6 Wm2.

Cela signifie qu'en moyenne, il tombe environ 1,6 Wm2 d'énergie en plus par mètre carré de surface terrestre qu'en 1750 environ. Par rapport à cette valeur, l'impact de la gestion de l'eau d'un pays sur ses conditions climatiques est, au moins au niveau local, sensiblement plus important. »

– Michal Kravcík & al, 2007. Water for the Recovery of the Climate, A New Water Paradigm

'Fondamentalement, le changement climatique est causé par la déforestation, la désertification et l'urbanisation continues de la planète. […]

Nos modes d'utilisation intensive des terres provoquent l'assèchement de la planète. La corrélation entre les températures mondiales et le CO2 atmosphérique est en fait une corrélation entre la végétation et l'évapotranspiration, qui est le plus gros consommateur d'énergie de la planète. […]

Une réduction de l'évapotranspiration entraîne la conversion du rayonnement solaire global à ondes courtes en émissions à ondes longues et en chaleur sensible. […]

La plus grande transformation d'énergie au niveau mondial est le processus d'évaporation-condensation, suivi de la transformation de l'eau en glace dans les nuages.

Au total, un mètre cube d'eau évaporée consomme 680 kWh (eau en vapeur à 20 °C) ou libère 92 kWh (eau en glace). Une rupture dans le petit cycle de l'eau [cycle continental de l'eau] signifie que les processus de précipitation-évaporation-condensation perturbent et libèrent le rayonnement thermique et la chaleur sensible, plusieurs fois.'

– Marco Schmidt « Global Climate Change: The Wrong Parameter ». RIO 9 — World Climate & Energy Event, 17–19 mars 2009.

Pour l'auteur de ces lignes, les émissions provenant des ressources en combustibles fossiles sont mal interprétées. Les variations de la concentration en CO_2 sont essentiellement liées aux variations de développement de la végétation mondiale.

La déforestation, la mise à nu des sols, la désertification et l'urbanisation sont les principales causes de l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère :

« La végétation est le principal facteur d'entraînement de nombreux systèmes et processus terrestres, et le CO2 est un indicateur du processus de photosynthèse. La principale conversion d'énergie pour la photosynthèse est l'évapotranspiration. La végétation est principalement responsable de l'évapotranspiration sur terre ; collectivement, la surface des feuilles est beaucoup plus grande que la surface de l'eau libre. Les arbres, s'ils reçoivent suffisamment d'eau, ont une énorme capacité de réduction de la chaleur sensible.

Il existe bien une corrélation entre les températures mondiales et le dioxyde de carbone (CO2) atmosphérique, mais il s'agit d'une association très générale sans cause directe.

De plus, la corrélation en elle-même est insuffisante pour décrire une interrelation directe, car bien souvent les changements de température ne se produisent qu'après le CO2. Étant donné que la végétation est le principal moteur du CO2 atmosphérique, il s'agit d'un indicateur des processus de la végétation.

L'écologie décrit les processus du cycle au niveau de la relation producteur-consommateur.

Dans le cadre du processus de photosynthèse, l'évapotranspiration convertit le CO2 en O2 et en sucre.

À son tour, la photosynthèse, qui est l'un des processus dominants de la Terre, définit le stock mondial de dioxyde de carbone et d'oxygène.

Avec un taux de 0,038 % de CO2 et 20,9 % d'O2, la végétation est "consommatrice" de ces gaz, et sa respiration dans le cadre de la photosynthèse détermine ces concentrations de gaz. À cet égard, l'émetteur de gaz à effet de serre n'a pratiquement aucune influence, et le rejet anthropique de CO2 est de faible importance à l'échelle mondiale.

Ce n'est qu'à partir d'un taux de 10 % de CO2 et de 10 % d'O2 dans l'atmosphère que l'émetteur commencerait à avoir une plus grande influence sur ce stock que le consommateur. »



FONCTIONS RÉGULATRICES DE L'EAU

L'eau équilibre les extrêmes thermiques entre le jour et la nuit, entre les différentes saisons et entre les différentes régions, tout en tempérant les extrêmes météorologiques.

Plus il y a d'eau dans l'atmosphère, plus son effet modérateur sur les températures est fort et plus les écarts de température sont faibles.

Moins il y a d'eau dans l'atmosphère, plus son effet modérateur sur les températures est faible et plus les écarts météorologiques sont extrêmes. Lorsque l'eau manque dans le sol et dans l'atmosphère, les conditions thermiques extrêmes prédominent généralement.

L'eau et la vapeur d'eau influencent de la manière la plus significative le climat sur Terre.

Malgré cela, son rôle dans l'atmosphère est l'une des questions les moins étudiées et les plus rarement discutées.

FONCTION THERMORÉGULATRICE DE LA PLUIE ET DES NUAGES

Le rayonnement solaire tombant évapore l'eau des mers, des lacs, des rivières, des zones humides, du sol et des plantes dans l'atmosphère. L'évaporation de chaque molécule d'eau consomme de la chaleur et refroidit ainsi la surface de la Terre.
L'eau évaporée dans l'atmosphère se condense et forme des nuages, du brouillard, des précipitations.

La vapeur d'eau qui monte plus haut dans l'atmosphère se condense sous l'influence de l'air froid et libère ainsi de l'énergie thermique. Refroidie dans les hauteurs de l'atmosphère, elle retourne au sol sous forme de pluie.

La répétition de ce processus représente le mécanisme d'action clé pour l'élimination de l'énergie thermique excédentaire et ressemble à un ingénieux équipement de climatisation.
Les recherches sur les effets thermorégulateurs des nuages et leur équilibre se sont révélées très intéressantes au regard des problèmes actuels de l'humanité. Les nuages jouent un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre énergétique de la Terre, ou « *bilan radiatif* », c'est-à-dire la quantité de rayonnement qui entre et sort de la Terre.

Par un processus connu sous le nom de « refroidissement par ondes courtes », les nuages renvoient une partie du rayonnement solaire dans l'espace, ce qui a un effet net de refroidissement sur le système surface-atmosphère de la Terre.

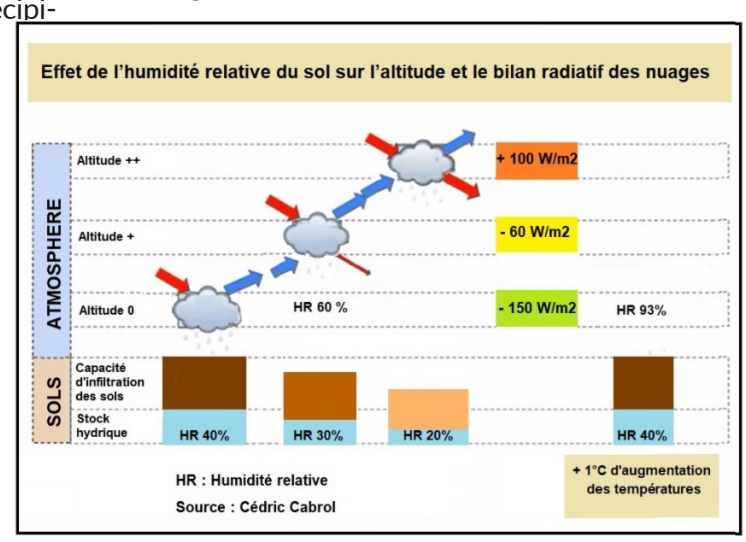
Dans le même temps, les nuages contribuent à contenir le rayonnement qui, autrement, serait émis vers l'espace, par le biais du « réchauffement des ondes longues », ce qui a un effet net de réchauffement sur le système climatique.
Il est largement connu que l'effet réchauffant ou refroidissant des nuages dépend de leur altitude :

– Les cirrus hauts et fins contribuent à réchauffer la surface de la Terre en laissant passer la lumière du soleil, mais en piégeant ensuite la chaleur émise par la surface.

– Les nuages bas et épais de type cumulus contribuent à refroidir la surface en réfléchissant la lumière solaire entrante vers l'espace.

Ce qui est moins connu est que l'altitude à laquelle se forment les nuages dépend largement de l'humidité relative du sol qui est elle-même liée à la couverture végétale des sols.

Le diagramme ci-dessous schématise le lien entre l'humidité relative (HR) du sol et l'altitude des nuages.



Théoriquement un nuage apparaît lorsque l'humidité relative de l'atmosphère atteint 100 %, c'est-à-dire quand il y a saturation de l'air en vapeur d'eau.

Lorsque l'humidité relative du sol est de 40 %, la saturation de l'atmosphère en eau se produit à basse altitude. Les stratocumulus par exemple qui sont des nuages bas se forment entre 500 et 1000 m.

Ces nuages de basse altitude prélèvent 150 Watts par mètre carré. (la perturbation initiale du réchauffement climatique équivaut à 3 W/m²). Ils exercent largement un effet refroidissant.

Lorsque l'humidité relative du sol est de 30 %, la saturation de l'atmosphère en eau se produit plus haut et le prélèvement de chaleur diminue. Il n'est plus que de 60 Watts par mètre carré.

Si l'humidité relative du sol n'est que de 20 %, la saturation de l'atmosphère en eau se produit encore plus haut et, dans ce contexte, les nuages induisent cette fois-ci un effet de serre de 100 Watts par mètre carré.

En résumé, moins le sol est saturé d'eau, plus l'altitude à laquelle l'atmosphère est saturée d'eau augmente et moins les nuages exercent une action refroidissante. Faire en sorte que le sol soit une éponge — et pour cela il faut qu'il soit saturé de vie et couvert de végétaux — permet la fixation des nuages à basse altitude et contribue largement à rafraîchir les températures.

On notera qu'avec une augmentation des températures globales de +1 °C, pour la même humidité relative du sol, les nuages se forment plus haut et qu'il faut 7 % d'eau supplémentaire dans les sols pour maintenir les nuages à la plus basse altitude.

À notre connaissance, ce type de données n'est pas pris en compte dans les modèles du GIEC.

FONCTION THERMORÉGULATRICE DE L'EAU ET DE LA VÉGÉTATION

Les zones aquatiques, les sols saturés d'eau et la végétation jouent chacun un rôle important dans la circulation de l'eau sur terre.

La végétation et en particulier les arbres que l'on peut voir comme de l'eau verticale remplissent une fonction tampon entre le sol et l'atmosphère.

- la végétation protège le sol de la surchauffe, et donc du dessèchement ;
- elle optimise la quantité d'évaporation grâce à la transpiration à travers les nombreux pores (stomates) des feuilles ;
- elle influence également de manière significative l'infiltration et le ruissellement de surface dans les bassins versants.

Une végétation bien pourvue en eau a donc un effet rafraîchissant important et une capacité de climatisation.

De plus cette végétation stocke du carbone.

En revanche, la déforestation, la mise à nu des sols dans le cadre de l'agriculture conventionnelle et l'artificialisation des sols notamment par l'urbanisation modifient la quantité et la répartition de l'eau sur les terres émergées.

Par ses modes de transformation des milieux qu'elle occupe, l'humanité modifie massivement les flux d'eau et d'énergie.

Selon les choix d'aménagement des milieux qu'ils occupent, les humains disposent donc aussi d'un levier majeur sur les climats locaux et globaux

La végétation et en particulier les forêts ont une couleur plus foncée et donc un pouvoir réfléchissant ou albédo plus faible que la plupart des autres surfaces (argile, sable, etc.), mais les plantes, indépendamment de l'albédo, refroidissent par transpiration.

Si le rayonnement solaire tombe sur une surface bien pourvue en végétation et en eau, la majorité de l'énergie solaire est consommée dans l'évaporation et en « *chaleur latente* » qui ne modifie pas les températures, le reste est utilisé pour la photosynthèse, absorbé par le sol qui se réchauffe, réfléchi en « *chaleur sensible* ».

Si les rayons du soleil tombent sur une surface non protégée par un couvert végétal et drainée, la majeure partie du rayonnement solaire est convertie en chaleur sensible qui se traduit par une élévation des températures.

L'importance primordiale de la végétation terrestre pour le climat réside dans son influence sur la transformation du rayonnement solaire.

La différence fondamentale entre des terres nues et drainées et des terres couvertes de végétation et saturées d'eau réside dans la manière dont l'énergie solaire est dissipée, c'est-à-dire dans sa transformation en d'autres formes d'énergie.

CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE

Le sort de l'énergie solaire entrante dépendra considérablement de la teneur en eau des écosystèmes, qui influencera fortement la répartition de l'énergie solaire entre les deux principaux flux d'énergie appelés «*chaleur sensible*» (sensible heat) et «*chaleur latente* » (latent heat).

La première modifie la température d'une matière tandis que la seconde modifie l'état physique (solide, liquide ou gazeux) de la matière.

Comme son nom l'indique, la chaleur sensible s'accompagne d'une variation que nous pouvons ressentir de la température des substances ou des corps que nous pouvons ressentir.

La chaleur latente, elle, ne s'accompagne d'aucun changement de température. La chaleur latente est la quantité d'énergie ajoutée ou retirée à une substance pour produire un changement de phase c'est-à-dire un passage d'un état (solide, liquide ou gazeux) à un autre. Lors de la vaporisation, cette énergie décompose les forces d'attraction intermoléculaires.

L'énergie solaire qui rencontre de l'eau ne fait monter sa température que marginalement; elle entraîne essentiellement une modification des mouvements des molécules d'eau.

La chaleur latente de vaporisation de l'eau est la quantité d'énergie que l'eau doit recevoir pour se transformer en vapeur à la même température. L'évaporation de la surface libre d'un liquide a lieu à toute température, l'intensité de cette évaporation augmentant avec la température du liquide, avec la taille de sa surface libre et avec l'élimination de la vapeur formée au-dessus du liquide.

Au point d'ébullition, le liquide s'évapore non seulement à la surface, mais aussi à l'intérieur.

La chaleur latente spécifique (c'est-à-dire la chaleur latente par unité de masse) de l'eau sous pression normale et à une température de 25 °C est de 2243,7 kJ/kg. Cela indique la quantité d'énergie solaire qui est consommée pour évaporer chaque litre d'eau sans augmenter la température (cette même quantité de chaleur est libérée plus tard lors de la condensation de la vapeur d'eau dans un endroit plus froid).

La chaleur latente de condensation procède de la même manière, mais en sens inverse. Elle est la quantité d'énergie qu'il faut extraire à la vapeur saturée pour obtenir de l'eau. Lorsque de la chaleur latente est ajoutée ou supprimée, aucun changement de température ne se produit.

Selon la teneur en eau des écosystèmes, l'énergie solaire reçue à la surface terrestre va donc se transformer dans des proportions variables en chaleur latente et en chaleur sensible.

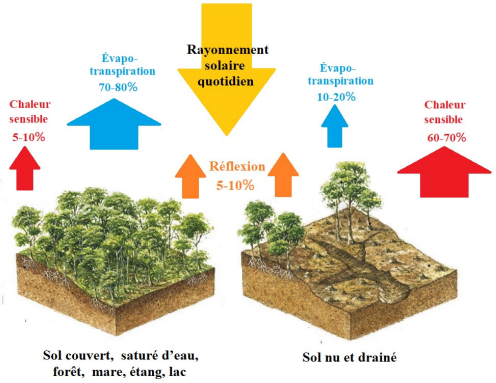
Si l'eau est peu présente, une grande partie de l'énergie solaire est transformée en chaleur sensible et la température de l'environnement augmente fortement.

Dans un paysage desséché, jusqu'à 60 % du rayonnement solaire se transforme en chaleur sensible.

En revanche, dans un paysage saturé d'eau, jusqu'à 80 % du rayonnement pur peut être lié à la chaleur latente de la vaporisation de l'eau et seule une très petite partie du rayonnement solaire est transformée en chaleur sensible.

La végétation joue un véritable rôle de climatisation.

Distribution de l'énergie solaire sur un terrain drainé et sur un paysage saturé d'eau



L'ARBRE COMME CLIMATISEUR



Les plantes transpirantes, en particulier les arbres, sont un système de climatisation de la Terre

Imaginons un grand arbre dont la couronne a un diamètre d'environ dix mètres.

Sur la couronne de cet arbre, qui a une surface de 80 m2, il tombe chaque jour environ 450 kWh d'énergie solaire (4-6 kWh/m2).

Une partie de l'énergie solaire est réfléchie, une partie est absorbée par le sol et une partie est convertie en chaleur. Si un tel arbre est bien approvisionné en eau, il transpire et évapore 400 à 450 litres d'eau par jour.

Pour la transformation de 450 litres d'eau de l'état liquide en vapeur d'eau, 280 kWh sont consommés.

Cette quantité d'énergie représente donc la différence entre l'ombre d'un arbre et celle d'un parasol de même diamètre.

Au cours d'une journée ensoleillée, un tel arbre rafraîchit donc avec une puissance égale à 20-30 kW, puissance comparable à celle de plus de 10 climatiseurs.

Les millions de stomates des feuilles des arbres réagissent à la chaleur et à l'humidité de l'environnement. L'essentiel est que l'énergie solaire liée à la vapeur d'eau est transportée et libérée lors de sa condensation dans les endroits frais sans augmentation de température.

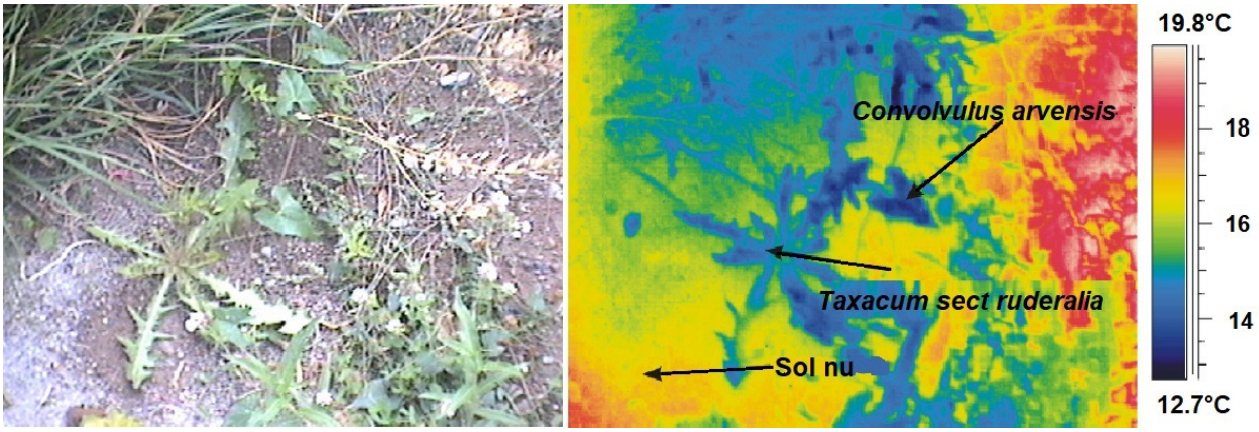
L'arbre équilibre ainsi la température dans le temps et l'espace, contrairement à un réfrigérateur ou à un climatiseur, qui libère de la chaleur dans leur environnement proche.

Tout en climatisant le milieu, l'arbre absorbe le bruit et la poussière, fixe le CO_2 et abrite une grande biodiversité.

L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DES PLANTES

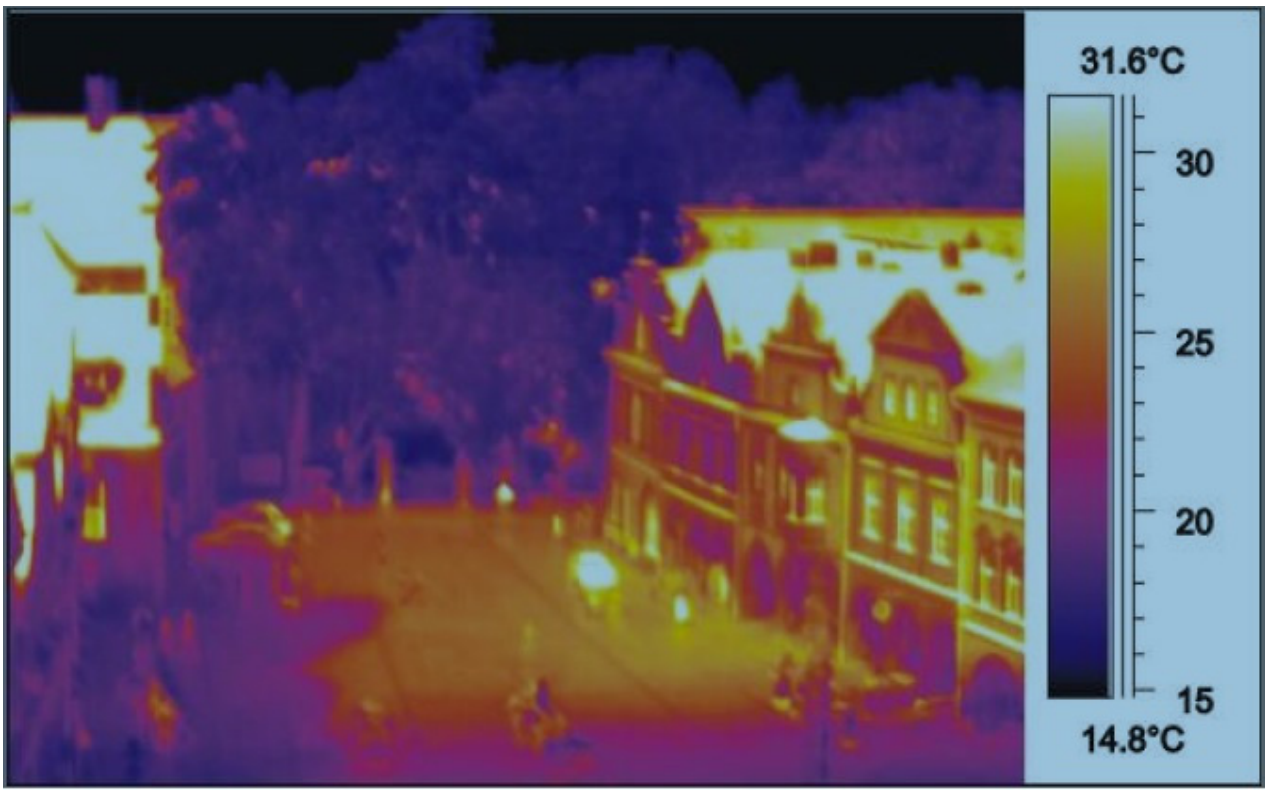
L'effet de refroidissement des plantes dû à la transpiration est visible sur la photographie ci-dessous. Le spectre infrarouge montre que les feuilles des plantes sont, grâce à la transpiration, visiblement plus froides que le sol environnant.

La surface nue du sol est visiblement plus chaude que la surface des feuilles refroidies par la transpiration.

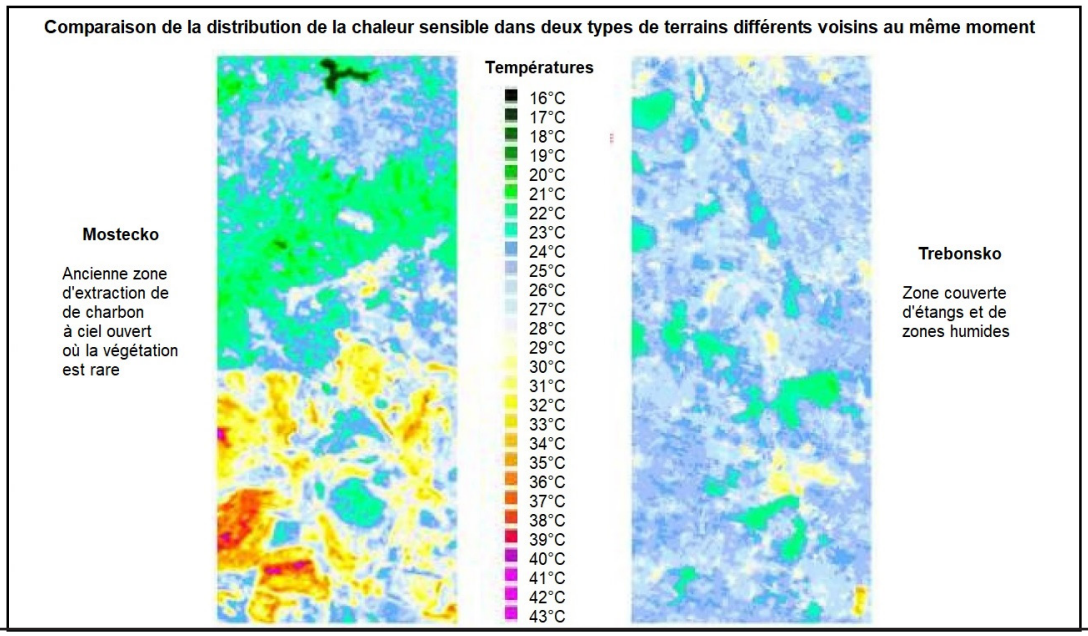


L'effet rafraîchissant de la végétation est également évident sur les photos infrarouges de la place et du parc de la ville slovaque de Trébon.

La température des toits et des façades des maisons dépasse les 30 °C, alors que celle des arbres du parc est d'environ 17 °C. La végétation refroidit activement par l'évaporation de l'eau.



Un autre outil utile pour juger de l'état de la végétation et de sa fonction lors de la distribution de l'énergie solaire sur de grandes surfaces est de prendre des photos satellites.



À droite, Trebonsko, couvert d'étangs et de zones humides, présente une différence de température locale plus faible que le terrain plus sec de la zone d'extraction de charbon à ciel ouvert de Mostecko où la végétation est insuffisante (à gauche). Les températures les plus élevées se trouvent dans des endroits sans végétation. Les amplitudes thermiques sont évidemment plus élevées à Mostecko, en comparaison avec Trebonsko, où les différences de température sont équilibrées grâce à son humidité plus élevée.

DÉMONSTRATION DE L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DES PLANTES

Les choix d'aménagement des sols conduisent à des modifications colossales des flux d'énergie expliquent Michal Kravčík et ses collègues :

«Le drainage et l'élimination de la végétation à grande échelle sont liés à la libération d'une quantité colossale de chaleur et à la formation de ce que l'on appelle des "plaques chaudes" sur terre.

La chaleur sensible dégagée par seulement 10 km2 de terres artificialisées et drainées (une petite ville) pendant une journée ensoleillée est comparable à la puissance de toutes les centrales électriques de la République slovaque (6000 MW[1]).

Une baisse de l'évaporation d'un millimètre par jour sur l'ensemble du territoire de la République slovaque (49 000 km2) entraîne un dégagement de chaleur sensible d'environ 35 000 GWh pour une journée ensoleillée. Il s'agit d'une quantité de chaleur supérieure à la production annuelle d'électricité de toutes les centrales électriques de la République slovaque.

L'effet des activités humaines sur le sol n'est pas encore pleinement apprécié.»

Le drainage des terres aménagées s'accompagne d'une baisse de la végétation fonctionnelle. Sous l'influence de l'impact négatif du drainage et de la perte de la végétation fonctionnelle permanente sur le régime des pluies et sur la répartition des températures, nous sommes progressivement devenus victimes de la dégradation et de la désertification de vastes zones de terres autrefois fertiles.

Un nouveau paradigme permettrait de renverser cette approche en concentrant l'attention sur l'impact des modifications du cycle de l'eau sur les changements climatiques.

Une vision alternative ouvre la possibilité de modalités d'action et de la mise en œuvre immédiate de solutions constructives à de nombreux problèmes liés aux changements climatiques.

Le drainage des terres aménagées s'accompagne d'une baisse de la végétation fonctionnelle.

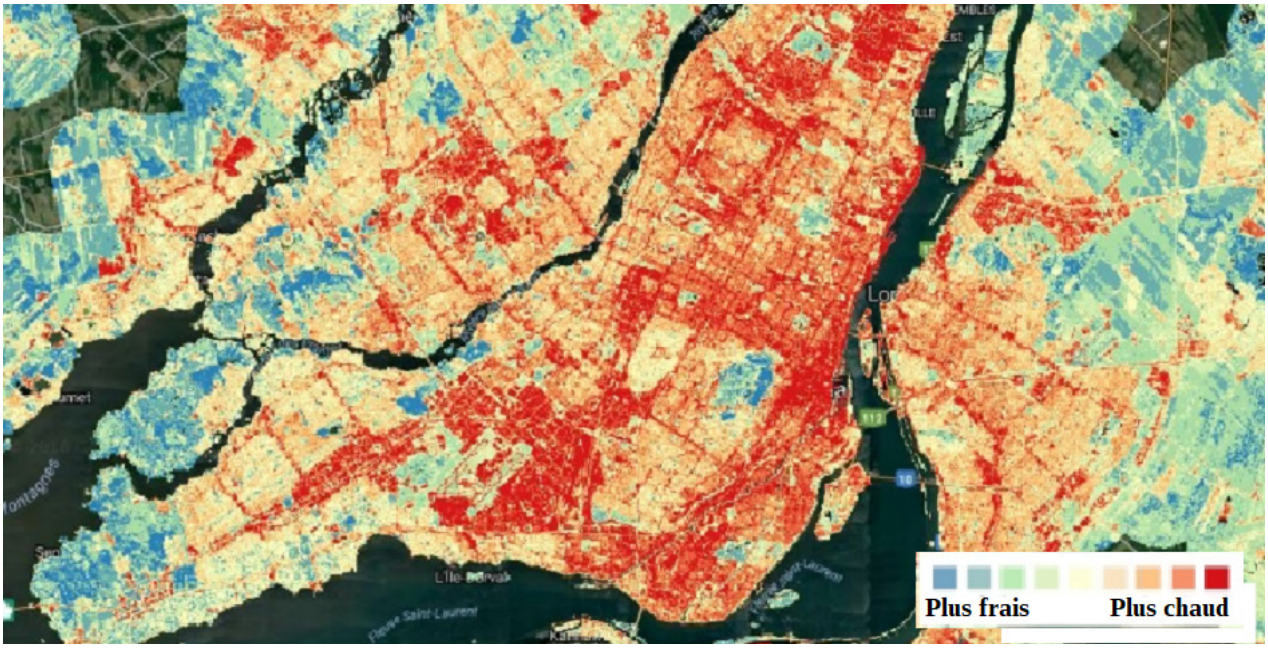
Sous l'influence de l'impact négatif du drainage et de la perte de la végétation fonctionnelle permanente sur le régime des pluies et sur la répartition des tem-

1MW, 1 mégawatt (million de watts) indique la puissance maximale d'une installation. kWh, kilowatt heure, indique la quantité d'électricité produite ou consommée. MWh : 1 mégawatt heure = 1000 kWh. GWh : 1 gigawatt heure = 1 million de kWh. TWh: 1 térawatt heure = 1 milliard de kWh.

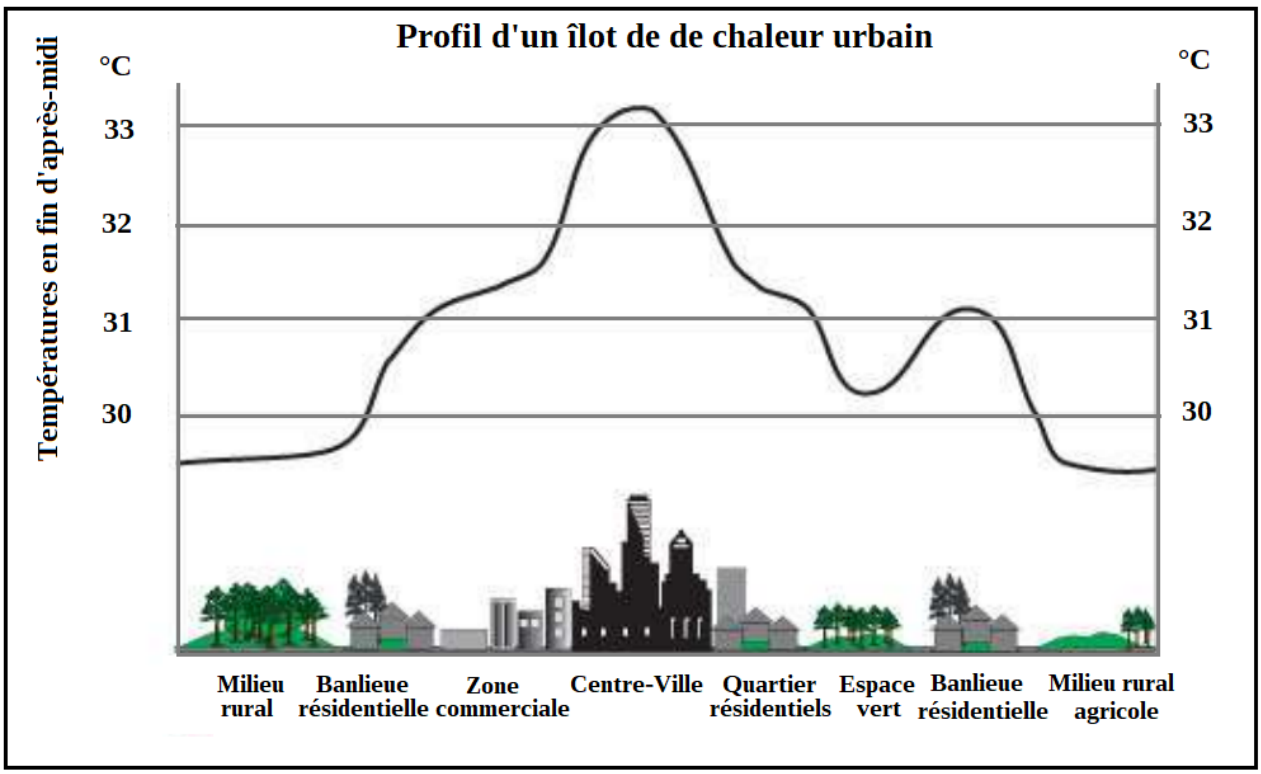
pératures, nous sommes progressivement devenus victimes de la dégradation et de la désertification de vastes zones de terres autrefois fertiles.

Un nouveau paradigme permettrait de renverser cette approche en concentrant l'attention sur l'impact des modifications du cycle de l'eau sur les changements climatiques.

Une vision alternative ouvre la possibilité de modalités d'action et de la mise en œuvre immédiate de solutions constructives à de nombreux problèmes liés aux changements climatiques.»



Températures relatives sur l'île de Montréal.
(source : Ilots de chaleur/fraicheur urbains et température de surface 2012, INSPQ et CERFO)



LE « PETIT CYCLE DE L'EAU »

Ce que Michal Kravčík et d'autres hydrologues appellent « le petit cycle de l'eau » est un circuit fermé de l'eau dans laquelle l'eau évaporée sur terre retombe sous forme de précipitations sur ce même milieu terrestre. D'autres scientifiques l'appellent cycle continental ou cycle local par opposition au cycle global incluant les océans.

« Tout comme il existe un petit cycle de l'eau sur la terre, il existe également un petit cycle de l'eau sur les mers et les océans. Des interactions mutuelles ont lieu entre les différents petits cycles de l'eau, car ils se produisent dans l'espace et dans le temps sur de vastes zones présentant des morphologies et des surfaces différentes, avec des niveaux d'humidité et d'eau de surface variables.

La circulation de l'eau dans le petit cycle de l'eau est donc partiellement horizontale, mais contrairement à celle du grand cycle de l'eau, le mouvement vertical est le plus caractéristique. L'évaporation de zones adjacentes ayant des températures différentes concourt mutuellement à la création et au développement de la couverture nuageuse. On peut peut-être aussi dire que l'eau au-dessus de la terre circule en même temps dans de nombreux petits cycles de l'eau qui sont subventionnés par l'eau du grand cycle de l'eau.

Le nom "petit cycle de l'eau" peut donner l'impression que ce cycle ne concerne qu'une petite quantité d'eau, mais c'est le contraire qui est vrai : les précipitations annuelles moyennes sur terre sont de 720 mm et l'apport des mers est d'environ 310 mm. La terre génère donc la plus grande partie de ses propres précipitations (410 mm) à partir de sa propre évaporation terrestre. Les précipitations d'une région sont partagées par la saturation du sol en eau de pluie et, par le biais du petit cycle de l'eau, environ la moitié ou les deux tiers de l'eau de pluie (50 à 65 %) sont utilisés pour la création répétée de précipitations sur la terre.

Prendre pleinement conscience de ce phénomène devrait changer fondamentalement notre approche actuelle de la gestion de l'eau. L'humanité ne peut pas transformer et drainer la terre indéfiniment sans avoir également un impact sur ses précipitations et son régime thermique.

Si nous voulons avoir des précipitations stables sur les terres, il est très important d'assurer l'évaporation de ces mêmes terres. L'évapotranspiration des eaux de pluie des terres est en simplifiant le phénomène (c.-à-d. en mettant de côté l'accumulation souterraine de l'eau), la différence entre les précipitations et le ruissellement. Si nous avons un grand écoulement d'eau d'un territoire, cela se fera au détriment de l'évaporation et provoquera une diminution ultérieure des précipitations. Le volume d'eau du petit cycle de l'eau sur le territoire va progressivement diminuer. Avec une diminution du ruissellement, en revanche, on obtient une plus grande évaporation et donc on "sème" et on "cultive" réellement la pluie. »

– Michal Kravčík et al. 2007

CHANGER DE PARADIGME !



« La moindre goutte de pluie ne devrait pas se déverser dans la mer sans avoir été utilisée au préalable pour le bien du peuple. »

– Parakramabahu, roi du Sri Lanka (1153 - 1186)

Les pratiques évoquées par Michal Kravčík et ses collègues sont orientées par le principe de saturation du « petit cycle de l'eau » terrestre, c'est-à-dire le cycle de l'eau intérieur aux zones continentales.

Saturer le cycle hydrologique implique de conserver autant que faire se peut l'eau de pluie in situ, là où elle tombe.

Pour cela, il n'est point besoin de hautes technologies révolutionnaires. Des pratiques traditionnelles parfois multimillénaires sont disponibles.

Ces techniques ont le méritent d'à la fois :

– permettre aux sols de retenir plus d'eau qui se trouve être alors plus longtemps disponible pour les plantes cultivées ou sauvages ;

– minimiser l'érosion des sols ;

– recharger les nappes phréatiques ;

– maximiser le potentiel productif des sols ;

– rafraîchir localement les températures ;

– rafraichir plus globalement les températures selon l'échelle des réhabilitations des cycles hydrologiques ;

– restaurer et maximiser les cycles de l'eau locaux.

QUE VEUT DIRE « CHANGER DE PARADIGME » ?



Aménagement de terrasses et de zones arborées en climat méditerranéen

Un paradigme est une représentation du monde, une manière de voir les choses, un modèle de pensée cohérent qui orientent les attitudes et les pratiques aussi bien scientifiques que sociales.

Autrement dit, un paradigme est une matrice pour la pensée et l'action qui, pour un temps, dicte de manière consciente ou non, en premier lieu aux scientifiques et plus largement à la société quels sont les bonnes questions, les problèmes types, comment les aborder, pour trouver les solutions à y apporter.

Pour Michal Kravčík et ses collègues, le paradigme actuel de l'eau, qu'ils appellent malicieusement « *le paradigme ancien* », ne permet pas de formuler correctement les problèmes liés à circulation de l'eau dans le monde.

Penser et agir en restant dans le paradigme qui a généré les difficultés auxquelles l'humanité est confrontée — augmentation des températures locales et globales, recrudescence des épisodes extrêmes d'inondations, sécheresses, désertification… — ne saurait leur apporter de solutions valables.

Ce faisant, ces hydrologues reprennent la maxime prêtée à Albert Einstein :

> *« Nous ne pouvons pas résoudre nos problèmes avec la même pensée que nous avions quand nous les avons créés. »*

L'enjeu de fonder notre pensée et nos actions sur un nouveau paradigme est de passer de notre posture passée et actuelle de bâtisseurs de désert à celle de bâtisseur d'oasis.

Les caractéristiques de « *l'ancien* » et du « *nouveau* » paradigme de l'eau telles que recensées par les auteurs de *Water for the Recovery of Climate – A New Water Paradigm* sont déclinées dans le tableau de la page suivante.

PRÉMISSES ET APPROCHES COMPARÉES DE L'ANCIEN ET DU NOUVEAU PARADIGME DE L'EAU

ANCIEN PARADIGME DE L'EAU	NOUVEAU PARADIGME DE L'EAU
L'eau sur terre n'a pas d'influence sur le réchauffement climatique qui est uniquement causé par l'augmentation du volume des gaz à effet de serre produits par l'activité humaine.	Un facteur important du réchauffement climatique pourrait être la modification du cycle de l'eau causée par l'assèchement puis le réchauffement des continents par l'activité humaine.
La recherche se focalise sur l'impact du réchauffement climatique sur le cycle de l'eau et les mesures d'adaptation pour diminuer cet impact	La recherche se concentre sur l'impact des changements du cycle de l'eau sur le réchauffement climatique et la mise en place de mesures pour restaurer des cycles de l'eau fonctionnels
L'urbanisation, l'industrialisation et l'exploitation économique d'un pays ont un impact minime sur le cycle de l'eau.	L'urbanisation, l'industrialisation et l'exploitation économique d'un pays (qui impactent environ 40 % de la superficie des continents) ont un impact fondamental sur l'influence du cycle de l'eau.
L'impact de l'humanité sur le cycle de l'eau est négligeable et les changements dans le cycle ne peuvent pas être inversés par l'activité humaine.	L'impact de l'humanité sur le cycle de l'eau est actuellement considérable et l'action humaine peut à l'avenir être positive ou négative.
Les tendances climatiques défavorables vont s'accentuer, l'atténuation peut peut-être être envisagée à l'horizon de quelques siècles.	Si la nouvelle approche de l'eau est appliquée, on peut s'attendre à un rétablissement du climat favorable à l'épanouissement de la vie en quelques décennies.
L'intérêt pour le grand cycle de l'eau, conçu comme difficile à influencer, est dominant L'importance du petit cycle de l'eau est banalisée.	L'intérêt pour le petit cycle de l'eau domine, sa restauration peut être un levier d'action rapide. Le grand cycle de l'eau peut être influencé favorablement par la restauration du phénomène de pompe biotique à moyen terme par la reforestation.
La raison des effets météorologiques extrêmes est le réchauffement de la planète.	Les effets climatiques extrêmes sont dus aux perturbations des cycles de l'eau.
Le réchauffement climatique et les effets météorologiques extrêmes sont inextricablement liés.	Le réchauffement climatique peut exister sans phénomènes météorologiques extrêmes, les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent exister sans réchauffement climatique.
Le réchauffement climatique est le principal problème climatique de l'humanité.	Les phénomènes météorologiques extrêmes sont le principal problème climatique de l'humanité.
La végétation n'est pas idéale du point de vue du réchauffement climatique, car elle a un faible albédo (pouvoir réfléchissant); la vapeur d'eau augmente encore l'effet de serre.	L'eau et la végétation atténuent les écarts de température indésirables; la végétation modère l'intensité du rayonnement solaire qui tombe sur la surface de la Terre et stocke le CO_2.
Met en avant l'atmosphère comme une couverture à effet de serre de la Terre.	Considère l'atmosphère comme une couverture protectrice de la Terre.
L'augmentation du niveau des océans est le résultat de la fonte des icebergs.	L'élévation du niveau des océans est le résultat de la fonte des glaciers sur terre, mais aussi de la diminution de l'humidité des sols, du niveau des nappes phréatiques et de l'état des autres eaux sur les masses continentales.
L'eau de pluie est un inconvénient qu'il faut évacuer rapidement.	L'eau de pluie est un atout qui doit être au maximum conservé in situ dans le sol et les plantes.
La principale source et réserve d'eau est l'eau de surface.	La principale source et réserve d'eau est l'eau souterraine.
Tend à générer une attitude impersonnelle des propriétaires et des utilisateurs des terres (citoyens, entreprises et administration) envers l'eau de pluie sur un territoire.	Développe un esprit de responsabilité partagée à l'égard des ressources en eau.
L'eau n'est utilisée qu'une seule fois pour un seul usage, puis elle est évacuée.	L'eau peut être utilisée à plusieurs fins, puis purifiée, recyclée pour pouvoir être réutilisée.
L'eau est fournie aux communautés principalement par le biais d'un système de canalisations avec une eau de qualité «potable».	L'eau est fournie par un système divisé en eau potable et eau de service.
Promeut une approche sectorielle de la gestion des ressources en eau sur le territoire.	Les politiques relatives à l'eau sont basées sur une perception approfondie de l'eau et du rôle de la végétation et des pratiques culturales et d'urbanisation dans le cadre d'une gestion intégrée et de restauration de cycles de l'eau fonctionnels sur un territoire.

PERTURBATION DES SOLS ET RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE



Tracteur labourant un champ.

Qui de la poule ou de l'œuf a précédé l'autre ? C'est en ces termes que se pose l'opposition entre, d'une part, les défenseurs de l'hypothèse dominante dans les rapports du GIEC, qui considèrent que le réchauffement induit par l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère perturbe les cycles de l'eau, et, d'autre part, les hydrologues qui considèrent que la perturbation des cycles hydrologiques est à l'origine du réchauffement climatique qui est une altération du système de climatisation de la terre et de son atmosphère.

Mais, il est aussi possible de déplacer les termes de ce dilemme. Les hydrologues établissent une relation de cause a effet entre la perturbation des sols, la dégradation du couvert végétal et la perturbation du cycle de l'eau.

Il est donc intéressant de poser plus directement la question du rôle potentiel de la dégradation des sols et de leurs couverts végétaux, directement liés aux modes culturaux de l'agriculture dominante et dans une moindre mesure au développement de l'urbanisation et de l'industrialisation dans la dégradation du climat et le réchauffement global de l'atmosphère planétaire.

Le lien de causalité entre dégradation des sols, dégradation des cycles de l'eau et émission de gaz à effet de serre est mis en évidence par Gérard Ducerf :

« Les sols en anaérobiose totale et toutes les substances notamment les lisiers qui sont en anaérobiose parce qu'ils sont en phase liquide provoquent des dégagements de méthane, gaz à effet de serre 74 fois plus puissant que le CO_2 (pour un même volume).

Adopter des pratiques qui favorisent l'émission de méthane concourt à la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre. Quand le sol est vivant, les microorganismes réorganisent le dioxyde de carbone pour le mettre sous forme organique. Mais s'il n'y a pas de vie et de microorganismes dans les sols, il ne peut y avoir de fixation du CO_2 atmosphérique.

Les microorganismes sont capables de capter le CO_2 atmosphérique pour le mettre sous forme organique et de capter l'azote de l'air pour équilibrer cette matière organique

Toute matière organique, pour qu'elle soit en bonne santé et fonctionne bien, doit être équilibrée en carbone et en azote. Donc, si on veut avoir une matière organique équilibrée dans le sol et si on veut capter du CO2 atmosphérique, il faut un sol vivant. »

– Gérard Ducerf

Avec l'océan, les sols représentent le plus grand réservoir terrestre de carbone organique, et la balance entre la formation et la perte de carbone organique du sol sera à l'origine de puissantes rétroactions carbone-climat au cours du siècle à venir.

Jusqu'à présent, les efforts pour prédire la dynamique du carbone organique du sol ont reposé sur des modèles basés sur les stocks qui présupposent et reposent sur la prise compte de catégories de carbone organique du sol ayant des propriétés physico-chimiques homogènes.

Or, les résultats de recherches récentes[1] suggèrent que le renouvellement du carbone du sol n'est pas principalement contrôlé par la chimie des apports de carbone, mais plutôt par les restrictions de l'accès microbien à la matière organique dans l'environnement spatialement hétérogène du sol.

Les processus dynamiques qui contrôlent la protection physico-chimique du carbone se traduisent mal dans les modèles de carbone organique du sol basés sur les stocks.

Les scientifiques sont mis au défi de trouver de nouveaux outils et de nouveaux modèles pour mesurer les rétroactions et effets réciproques entre changements environnementaux, perturbation et régénération des sols, cycle du carbone et de l'eau entre les sols et l'atmosphère. Certains ont relevé ce défi et proposé un nouveau modèle[2] :

> *« La centralité du cycle du carbone du sol dans le système climatique mondial souligne le besoin urgent de réconcilier les nouvelles connaissances avec les paradigmes traditionnels de la formation et de la perte de carbone du sol.*
> *À cette fin, nous souhaitons que le cadre PROMISE (Probabilistic Representation of Organic Matter Interactions Within the Soil Environment) initie le développement et la mise à l'épreuve de nouvelles hypothèses, d'outils analytiques et de cadres de modélisation qui éclaireront les contrôles mécanistes sur le flux de carbone lorsqu'il se déplace entre les plantes, les sols et l'atmosphère. Nous nous attendons également à ce que ce cadre stimule de nouvelles discussions et l'évaluation des cadres existants. Ces efforts devraient être soutenus par des collaborations multidisciplinaires entre les écologistes des sols, les biogéochimistes, les modélisateurs d'écosystèmes et les biologistes mathématiciens.*
> *Le but ultime de PROMISE est d'orienter la recherche vers une compréhension plus mécaniste et probabiliste des processus qui contrôlent les transformations biogéochimiques incessantes de la matière organique du sol.*
> *Les écosystèmes fonctionnent parce que le transfert d'énergie ne s'arrête pas.*
> *Ce n'est qu'en nous attaquant à la nature dynamique du carbone du sol que nous pourrons gérer efficacement cette ressource essentielle dans un monde en mutation. »*

Cette proposition de recherche interdisciplinaire est intéressante, mais ne devrait-elle pas s'élargir à des experts de l'eau et explorer comment flux et cycle du carbone et de l'eau s'articulent.

Si, comme le disent les promoteurs de cette nouvelle approche, le renouvellement du carbone du sol est principalement contrôlé par l'accès microbien à la matière organique, cet accès à la matière organique et l'existence même de cette matière est entièrement dépendante de la présence d'eau.

Cet oubli permanent de l'eau dans les analyses des perturbations est tout à fait étonnant. L'eau est comme la lettre volée d'Edgard Poe : elle est là devant les yeux des scientifiques, mais personne ne la voit.

Si l'eau est le premier gaz à effet de serre, pourquoi n'en parle-t-on pas ? La réponse de l'hydrologue Emma Haziza à cette question est la suivante :

> – la première raison est qu'à la différence du CO2, on ne dispose pas de mesure de l'évolution de l'eau et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère sur un temps long. « On peut mesurer l'évolution de la teneur en CO2 dans les calottes glaciaires en termes de nombre de particules de CO2 par million en allant chercher l'histoire de la terre à travers la glace. Pour l'eau un tel relevé est impossible, la calotte glacière, c'est déjà de l'eau et on ne peut y trouver l'information sur l'évolution de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère.
> – une autre raison tient au fait que l'eau étant le seul gaz à effet de serre qui finit par être instable et par condenser et nucléer, et retomber sous forme de pluie, la plupart des scientifiques considèrent que l'eau ne rentre pas dans la catégorie et le système des gaz à effet de serre, même si en termes d'effet de 60 à 80 % de l'effet de serre est lié à la question de l'eau.

Ainsi, c'est la manière même dont les scientifiques formulent leur question, définissent les problèmes et sont conceptuellement outillés qui invisibilise l'eau.

C'est donc bien à un changement de paradigme qu'il faut procéder comme le proclament Michal Kravčík et ses collègues.

1 P. Smith, S. Lutfalla, &al. « The changing faces of soil organic matter research » https://aura.abdn.ac.uk/bitstream/handle/2164/11564/EJSS_050_17_final_mao_PS_clean.pdf;jsessionid=DFD398E41688F-7922C3E246819627C70?sequence=1
'Soil carbon cycling proxies: Understanding their critical role in predicting climate change feedbacks', Global Change Biology · October 2017 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.13926
Daniela F. Cusack. Lars Markesteijn & al., « Soil carbon stocks across tropical forests of Panama regulated by base cation effects on fine roots » Biogeochemistry 2017

2 Bonnie G Waring, Benjamin N Sulman, & al., « From pools to flow: The PROMISE framework for new insights on soil carbon cycling in a changing world », Journal Global Change Biology, 2020/12 https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1731052

« PLANÈTE VERTE » VERSUS « PLANÈTE DÉSERTIQUE »



En 2000, Axel Kleidon, Klaus Fraedrich et Martin Heimann ont présenté les résultats de la modélisation mathématique du climat global de notre planète à partir de la simulation de deux conditions extrêmes[1] :

1.) un « monde désertique » sur toutes les masses terrestres (à l'exception des zones recouvertes de glaces ;

2.) une « planète verte », dans laquelle les mêmes surfaces terrestres étaient couvertes de végétation.

Ces modèles sont une simplification de la réalité, mais les résultats de la comparaison de la modélisation mathématique des paramètres liés à ces deux scénarios extrêmes restent très intéressants.

Selon ces modélisations, les précipitations sur les terres de la « *planète verte* » seraient deux fois supérieures à celles du « *monde désertique* ».

Sur la « *planète verte* », où l'évapotranspiration serait jusqu'à trois fois supérieures et la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère un tiers plus élevé, il y aurait paradoxalement environ un quart de ruissellement de surface en moins que dans le « *monde désertique* ». La température de surface annuelle moyenne sur l'ensemble de la « *planète verte* » (y compris les océans) serait inférieure d'environ 0,3 °C à celle du « *monde désertique* » et la température de surface sur les terres émergées serait inférieure de 1,2 °C.

Au-dessus des terres de la « *planète verte* », la couverture nuageuse serait supérieure d'environ 8 %.

Il est intéressant de noter que la couverture nuageuse plus importante sur la « *planète verte* » entraînerait une évaporation légèrement moindre des océans et une diminution des précipitations au-dessus de ceux-ci.

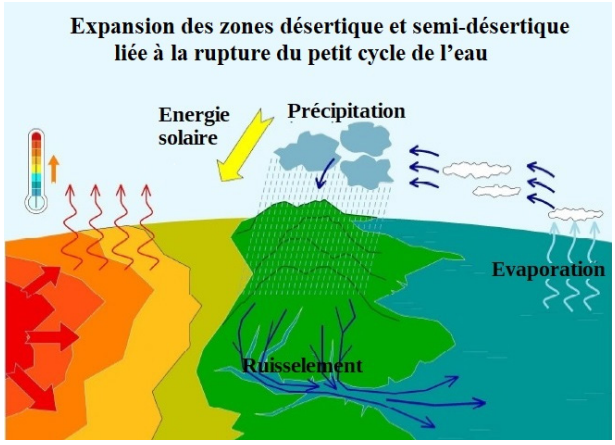
Toujours selon ces modèles, la plus grande couverture nuageuse de la « *planète verte* » n'entraînerait qu'une augmentation d'environ 5 % de l'absorption du rayonnement solaire, ce qui paraît étonnamment faible compte tenu de la différence de plus de 20 % de l'albédo des deux mondes.

Les changements les plus importants se produiraient dans les grandes étendues des régions arides d'Afrique, d'Asie du Sud et d'Australie, où, dans la simulation de la « *planète verte* », un climat forestier a été créé.

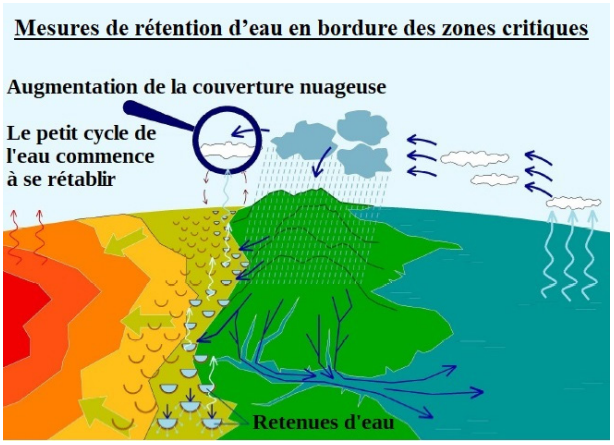
1 A. Kleidon, K. Fraedrich and M. Heimann. 'A Green Planet Versus a Desert World: Estimating the Maximum Effect of Vegetation on the Land Surface Climate', Climatic Change 44, Kluwer Academic Publishers, 2000

Le principe de reverdissement global de la planète a été schématisé par Michal Kravčík en trois croquis de la manière suivante :

1. SITUATION DE DÉPART



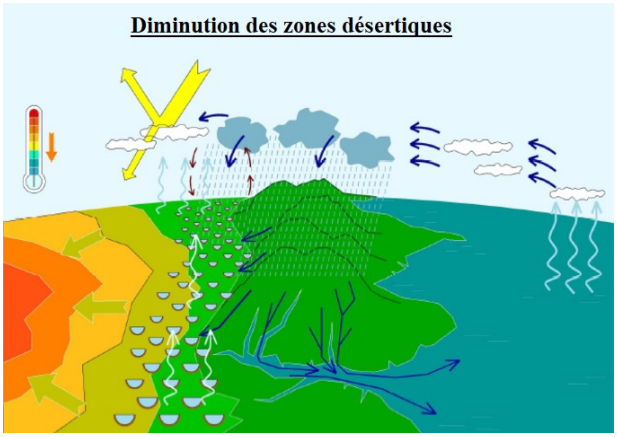
2. MESURES VISANT LA RÉTENTION MAXIMALE DES PRÉCIPITATIONS *IN SITU*



Le rôle des mesures de rétention est de récolter et de retenir l'eau du petit cycle de l'eau provenant des terres adjacentes ou l'eau du grand cycle de l'eau (même dans les déserts, il pleut de temps en temps).

La période de renouvellement du cycle de l'eau dépend des circonstances (conditions hydrologiques et pédologiques, succès de la croissance de la végétation protectrice, etc.).

3. DYNAMIQUE D'EXTENSION DES ZONES DE RESTAURATION DU « *PETIT CYCLE DE L'EAU* »



Le climat se rétablit dans une zone où le petit cycle de l'eau est renouvelé et peut éventuellement servir de point de départ à une expansion supplémentaire de la récupération hydrologique des terres.



Tomates, au Mas d'Agenais (Lino Chiaradia)

5| INITIATIVES RÉGÉNÉRATRICES

OÙ L'ON S'ÉMERVEILLERA DE LA DÉMONSTRATION QU'IL EST POSSIBLE DE TRANSFORMER DES DÉSERTS EN ÉDENS FERTILES ET FÉCONDS.



Illustration de L'homme qui plantait des arbres

REVERDIR LA PLANÈTE N'EST PAS UNE UTOPIE

« LA DIFFÉRENCE ENTRE LE DÉSERT ET LE JARDIN CE N'EST PAS L'EAU, C'EST L'HOMME »

Ce proverbe saharien nous rappelle que l'homme qui à la capacité de transformer le jardin d'Éden en enfer, peut aussi transformer le désert en oasis.

Dans *L'homme qui plantait des arbres*, Jean Giono relate qu'un homme parcourait les garrigues arides de Provence pour y semer des glands.

Les graines de chênes donnèrent naissance à des arbres et un jour des sources réapparurent.

> *« Le problème, dit mon ami Hervé Coves, est que nous ne croyons pas à cette histoire trop belle pour être vraie. Or, certaines personnes ont montré qu'il était possible de reverdir et rendre fertiles et fécondes des zones désertiques ou extrêmement dégradées, et de faire revenir des sources et renaître des cours d'eau là ils avaient disparu. Il n'y a là rien de magique, mais seulement une profonde intelligence des processus naturels du milieu et beaucoup de travail et de ténacité. »*

Parmi ces personnes aux initiatives remarquables, on peut citer :

- Geoff Lawton qui a reverdi le désert jordanien ;
- Yacouba Sawadogo « l'homme qui arrête le désert » au Burkina Faso ;
- Henri Girard et les acteurs de la ferme de Guié au Sahel
- Ernst Götsch et Sebastiao Salgado et Lélia Wanick au Brésil ;
- Narsanna and Padma Koppula en Inde…

Pour terminer cette revue de l'état de l'art des connaissances actuelles sur les cycles de l'eau et des applications pratiques qui peuvent en être tirées, je présenterai une série de réalisations qui illustrent le potentiel régénérateur d'initiatives humaines.

RESTAURATION DU PLATEAU DE LOESS EN CHINE



Plateau de Loess en province de Shanxi.
Photographie : Till Niermann

Il y a environ 3000 ans, des agriculteurs se sont installés sur le plateau Huangtu dans l'ouest de la Chine. Le plateau Huangtu appelé également « *plateau de lœss* » abritait alors d'abondantes forêts et prairies.

Cette région fut le berceau de la civilisation chinoise qui s'est développée en exploitant intensivement les ressources du milieu.

Au VIIe siècle, ses sols fertiles nourrissaient environ un quart de la population chinoise, mais ses modes d'exploitation agricole intensive, la disparition de la végétation pérenne et de la biomasse et des matières organiques accumulées dans les sols ont progressivement réduit la capacité du milieu à absorber et retenir l'humidité, et une superficie équivalente à celle de la France a fini par s'assécher et devenir désertique.

Le sol a perdu sa fertilité et a été érodé par le vent et la pluie, ne laissant derrière lui qu'un paysage stérile, si bien qu'il y a un millénaire, le site occupé par les premières dynasties chinoises a été abandonné par les élites de l'empire et par une grande partie de la population.

Au milieu de la décennie 1990, le plateau a été le théâtre d'un cycle récurrent d'inondations, de sécheresse et de famine imputables aux caprices du fleuve Jaune, qui fut surnommé la « *douleur de la Chine* ». Après ces dramatiques évènements, un vaste projet de restauration des sols de la région a été initié. Il durera douze ans.

Juergen Voegele, économiste agricole et ingénieur à la Banque mondiale qui a suivi le projet, rapporte :

> *« C'était le désert absolu. Quelques années plus tard, tout est revenu. Nous avons vu des oiseaux, des papillons, des insectes revenir. Tout l'écosystème a commencé à se rétablir. Même après des centaines d'années de dévastation complète, les graines étaient encore dans le sol et les choses ont commencé à se restaurer très rapidement. Nous ne nous attendions pas à cela. »*

En 2009, date de la fin du programme, environ 920000 des 65000000 hectares de la région avaient été restaurés. Pour parvenir à ce résultat, il avait été décidé à la fois de différencier les terres en attribuant une vocation écologique aux unes, économiques aux autres, et de permettre la saturation du « *petit cycle de l'eau* » en créant des terrasses, des trappes à sédiments, des retenues collinaires comme des microbarrages permettant de stocker l'eau et d'autres ouvrages permettant l'infiltration des eaux pluviales.

Parallèlement, des efforts ont été faits pour accroître la production de biomasse et de matières organiques en plantant massivement des arbres







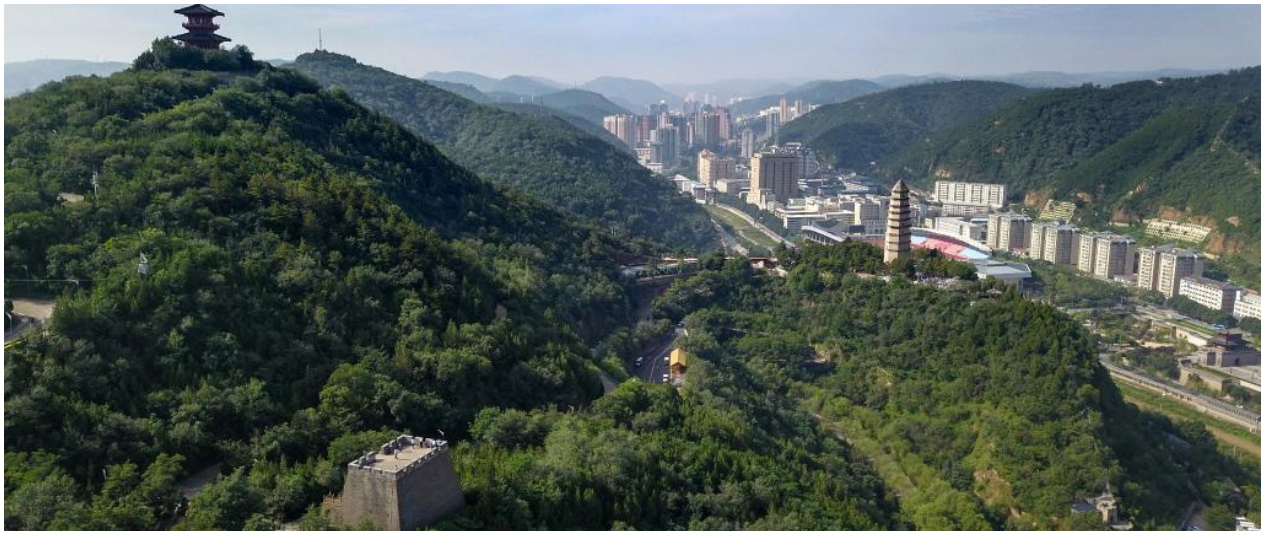

et en recourant à des méthodes agricoles, dites « *climato-intelligentes* ».

La restauration a pu être menée à bien, par la prise de conscience du fait qu'à long terme, la sauvegarde des fonctions écosystémiques s'avère nettement plus précieuse que la focalisation sur la production et la consommation de biens et de services.

Dans cette optique, il a été choisi de maximiser l'étendue des surfaces écologiques. Un constat inattendu tiré de la réduction des surfaces dédiées à la production est que la concentration des investissements et de la production dans un espace réduit n'a aucunement nuit à l'accroissement de la productivité économique.

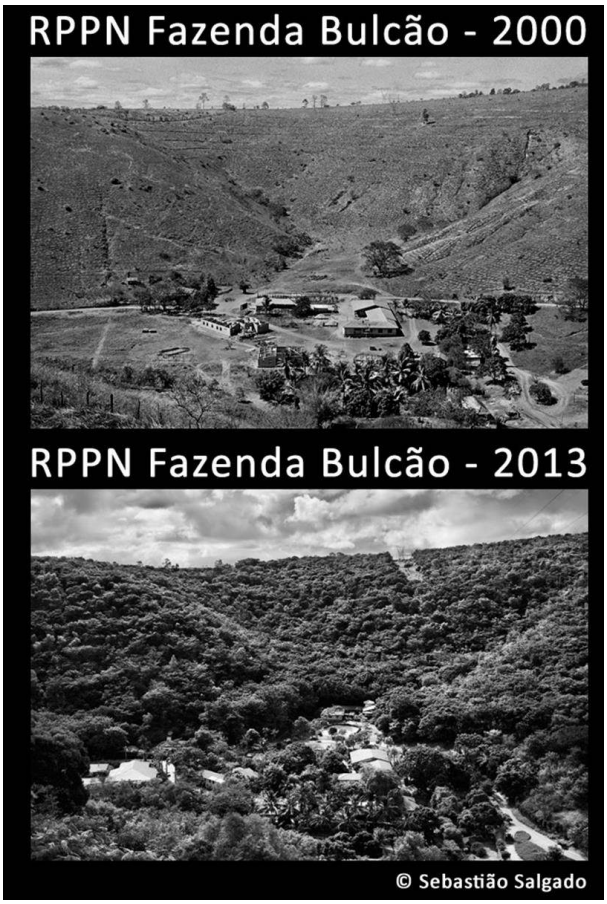
L'action menée sur le plateau des Lœss en Chine a montré qu'il est possible de réhabiliter des écosystèmes extrêmement dégradés à grande échelle. La réhabilitation écologique de vastes étendues ne permet pas seulement de faciliter l'adaptation aux impacts du changement climatique, elle ouvre la voie à un renforcement plus global de la résilience des milieux et des communautés humaines.

Plus globalement, ce projet a démontré l'importance y compris économique d'accorder davantage d'importance aux fonctions des écosystèmes.



En 1999, la municipalité de Yan'an a décidé d'entreprendre des travaux de conversion des terres agricoles en forêt dans toute sa région périphérique. Après plus de 20 ans d'efforts, le taux de couverture forestière a atteint 53,07 % et le taux de couverture verte urbaine a atteint 42,65 %. Aujourd'hui, la région de Yan'an est surnommée la « *terre sainte bleue* ». Le volume total des pertes d'eau et de sol a baissé de 23 %, le nombre de tempêtes de sable a considérablement diminué de même que le nombre de jours ou l'air est pollué dans la zone urbaine.

RENAISSANCE D'UNE FORÊT PRIMAIRE ATLANTIQUE DISPARUE AU BRÉSIL



Photoreporter brésilien renommé, Sebastião Salgado, revient dans son pays au milieu des années 1990 épuisé physiquement et émotionnellement après avoir documenté le génocide contre les Tutsi, au Rwanda. De retour dans sa région natale, il est choqué et dévasté de constater que là où il a passé son enfance, il ne reste rien de la luxuriante forêt tropicale qui l'enchantait autrefois.

> *« La terre était aussi malade que moi — tout était détruit, déclare Salgado. Dans les années 1940, plus de 70 % de la région étaient recouverts par la forêt atlantique. Début 2000, il n'en restait que 0,5 %. Puis ma femme a eu l'idée fabuleuse de replanter cette forêt. »*

Le couple entreprend le projet fou de planter 2,5 millions d'arbres dans le domaine familial de la province minière du Minas Gerais.

Ils créent l'*Instituto Terra* et frappent à toutes les portes pour récolter des fonds.

Il leur faut tout apprendre, car, pour réunir les conditions de la renaissance de la forêt disparue, c'est près de 300 espèces locales qu'il faut connaître et replanter. Les trois premières années, ils perdent 80 %, 60 % et 40 % des plants. Ils persistent, apprennent de leurs erreurs initiales.

Heureusement, sous les tropiques, tout pousse vite. Le paysage reverdit rapidement. Des perroquets, des jaguars, des espèces animales qu'on croyait éteintes réapparaissent. « *J'ai vu renaître le paradis de mon enfance, et la vie est revenue en moi* » déclare Sebastião.

Pour qu'un projet de reforestation réussisse, insiste Salgado, « *il faut planter des arbres indigènes, et pour cela, il faut récolter les graines dans la même région. Si vous plantez des forêts qui n'appartiennent pas à la région, la population animale ne se développera pas, et la forêt sera silencieuse.* »

Ainsi, après avoir pris le plus grand soin de s'assurer que tout ce qui était planté était des essences locales, la zone a remarquablement prospéré au cours des 20 années qui ont suivi et la faune est revenue.

Depuis sa fondation, l'*Instituto Terra* a planté quatre millions de jeunes arbres.

Pour Sebastião Salgado :

> *« Si l'humanité veut survivre, elle doit protéger la nature. C'est sans doute banal à dire, mais avec Lélia on continue d'agir. Il y a un seul être qui peut transformer le CO_2 en oxygène, c'est l'arbre. Nous devons commencer à planter des arbres à grande échelle.*
>
> *Avec Instituto Terra, on a élargi notre projet de reboisement à toute la vallée du Rio Dulce, qui a la taille du Portugal.*
>
> *Le fleuve qui la traverse est condamné par l'extinction progressive des 250 000 sources faute d'arbres. Avec leurs branches, leurs racines, ceux-ci jouent un rôle de rétention, de réservoir d'humidité, de régulateur. Sans eux, pas de source. Pour faire comprendre le programme, on parle de "replanter des sources ".*
>
> *Car si on ne fait rien, le fleuve sera sec en 2038 ! […] Notre plan prévoit la plantation de 70 millions d'arbres. On a commencé et on va y arriver… »*

CRÉATION D'UNE « FORÊT SYNTROPIQUE » AU BRÉSIL



Au Brésil, le scientifique suisse Ernst Götsch a lui aussi reboisé des centaines d'hectares désertiques, mais en suivant une voie différente de celle de Sebastião et Leila Salgado.

La formation initiale en génie génétique ne prédisposait pas particulièrement Ernst Götsch à cette aventure brésilienne. Dans les années 1960, il se passionne pour les OGM au sein de l'institut d'agronomie de Reckenholz à Zurich.

C'est l'époque de la révolution verte. Pour nourrir les populations, on cherche à accroître les rendements agricoles à grand renfort d'engrais et pesticides de synthèse et d'irrigation.

Dans son laboratoire, Götsch conçoit des génotypes de plantes résistantes aux maladies. Mais après quelques années, il constate que les variétés développées perdent leur résistance : « *Il fallait recommencer au bout de trois à huit ans, en créer de nouvelles. Ça devenait un travail de Sisyphe* », se souvient-il. Le chercheur décide alors de quitter l'univers confiné des laboratoires.

Il entreprend d'étudier le fonctionnement des plantes, des sols et des arbres dans des écosystèmes variés en Afrique et en Asie. En 1982, âgé de 34 ans, il part au Costa Rica puis au Brésil, où il veut acheter des terres pour mener ses expérimentations. Il acquiert 500 hectares dégradés dans la mata atlântica et, pendant des mois, sème avec une soixantaine de paysans un cocktail de graines d'arbres tropicaux, mais pas uniquement en se guidant sur le principe de la succession naturelle des espèces.

Il publiera le compte rendu de cette expérience dans une étude intitulée « *Natural succession of species in agroforestry and in soil recovery* » traduit en Français en 1999 par Gilles Lemieux sous le titre « *Une percée en agriculture : La remise en état des sols par l'utilisation du processus naturel de la succession des espèces* »[1].

Ernst Götsch résume le rêve qui le portait et son mode d'action initial ainsi « *Je voulais recréer la forêt originelle, mais le sol était devenu extrêmement sec, j'ai donc dû m'appuyer sur des graines d'arbres de régions semi-arides, comme les anacardiers, et même des variétés sénégalaises, pour faire remonter l'eau le long des racines. On a peur des mélanges, mais c'est de l'exotisme que provient notre richesse.* »

Ce faisant, Ernst Götsch a adopté une position qui est loin de faire l'unanimité chez les scientifiques.

1 Document accessible par le lien suivant : https://www.verdeterreprod.fr/wp-content/uploads/2019/05/GCBR-116-2003-%E2%80%93-Une-perc%C3%A9e-en-agriculture-la-remise-en-%C3%A9tat-des-sols-par-l%E2%80%99utilisation-du-processus-naturel-de-la-succession-des-esp%C3%A8ces-G%C3%B6tsch.pdf

Pour Emmanuel Torquebiau, « *faire voyager des graines comporte des risques. On peut importer des maladies ou des espèces potentiellement envahissantes.* »

Au principe de précaution énoncé par ce chercheur du Cirad, Ernst Götsch répond qu'« *il n'y a aucune maladie à craindre, du moment que l'écosystème est équilibré, la nature s'autorégule.* »

Contrairement à Sebastião Salgado, Ernst Götsch n'a donc pas cherché à recréer la forêt primaire qui préexistait, mais à généré une forêt nourricière inédite. Citronniers doux, bananiers, papayers, açais et aussi mangoustans, ramboutans ou durians, typiques des forêts asiatiques, d'autres de variétés venues d'Afrique cohabitent dans un écosystème fertile qui n'existe nulle part ailleurs.

Ernst Götsch a théorisé sa pratique et lui a donné le nom d'« *agriculture syntropique* » qui repose notamment sur le principe d'une plantation dense d'espèces variées formant des strates étagées et sur la taille sévère de la strate la plus haute pour laisser les plantes les plus basses accéder à la lumière et pour augmenter de manière massive la teneur en matière organique des sols.



« *C'est une idée géniale*, note Emmanuel Torquebiau, Götsch a créé une succession de strates d'arbres, comme dans une vraie forêt.

Ce système multiétagé lui permet à la fois de produire un grand nombre de plantes utiles à sa consommation personnelle, de se dégager un revenu grâce à la commercialisation de son cacao et d'avoir un sol riche, qui résistera mieux à la fois à la sécheresse et aux pluies diluviennes. »


Ernst Gotsch sur la ferme Sitio Sementes de Juã Pereira

Ernst Götsch explique que « la taille stimule la production d'acide gibbérellique, une hormone végétale favorisant la croissance.

Et, au niveau des racines, les mycorhizes, phénomène de symbiose entre les champignons et la plante, augmentent la production de nutriments.

C'est comme cela que l'on fertilise notre champ.

Dans la jungle, en général, cet élagage est assuré par les éléphants, qui cassent naturellement des branches sur leur passage. Je me contente de reproduire ce phénomène.

Ce système ne nécessite ni irrigation ni engrais.


Déclinaison locale de l'agriculture syntropique

NAISSANCE D'UN BOCAGE AU SAHEL



Au Sahel l'alliance de savoirs traditionnels locaux et du savoir ancestral européen lié à l'aménagement d'espaces bocager a permis de reverdir des zones arides devenues pratiquement incultes.

Dans la zone sahélienne, la rigueur des conditions climatiques rend l'activité agricole très difficile. Surpâturage, déboisement, ravinement, rayons solaires intensifs sur un sol nu se sont ligués avec la sécheresse permanente pour rendre la productivité agricole aléatoire. Les rendements sont constamment en baisse et les populations restent des proies faciles pour la famine, la malnutrition, etc.

Au Burkina Faso, la ferme pilote de Guiè animée par l'association AZN a été le lieu d'une expérimentation initiée par Henri Girard d'un aménagement bocager dans le but de restaurer les sols et d'aller à l'encontre de «*la fatalité*», et de mettre en œuvre des aménagements ruraux respectueux et réparateurs de l'environnement.

Paysage ordinaire versus paysage bocager au Sahel



Le bocage est un aménagement paysager ancien qui a s'est particulièrement développé en France entre le XIe et XIIIe siècle pour palier la perte de fertilité des sols après la disparition des forêts qui a consisté à confectionner des paysages agraires composés de mosaïques de prairies et de zones cultivées délimitées par des haies et des talus.



Bocage normand (Crédit Laurent Mignaux)

Au Sahel, la création d'un périmètre bocager « *wébougri* » en langue moré consiste d'abord à définir avec la communauté paysanne une zone particulière dédiée à la production agricole qui sera prémunie de la divagation du bétail.



Les auteurs du manuel technique « *Réalisation d'un périmètre bocager au Sahel* » expliquent :

« La première vocation du bocage est de garder l'eau de la pluie là où elle tombe par des aménagements de diguettes, de mares et de haies vives, afin d'atténuer l'action érosive des eaux de la mousson et de maintenir la biodiversité d'un milieu extrêmement fragile.

En regroupant les zones de culture sur une zone concentrée et pérenne, il devient cohérent et financièrement soutenable de protéger ce site contre les différentes menaces pesant sur l'agriculture : feu de brousse, érosion éolienne et hydrique, déprédation par le bétail.

Cette sécurisation de la production est un préalable à des pratiques visant à l'enrichissement des sols plutôt qu'à leur appauvrissement et l'intensification durable de l'agriculture paysanne.

Le périmètre est entouré par une haie mixte combinant une haie vive et un grillage métallique surmonté d'un barbelé.

Les haies vives autour des cultures et des prairies ont plusieurs utilités :

— elles viennent soutenir le grillage, nécessaire pour empêcher la divagation du bétail et ses dégâts (piétinement des aménagements, destruction des cultures et des haies) ;

— elles retiennent l'humidité et facilitent l'infiltration de l'eau, luttant ainsi efficacement contre l'érosion des sols ;

— elles agissent comme des barrières naturelles et des brise-vents, dans une zone où les vents peuvent être très violents et abîmer les cultures ;

— elles sont aussi un espace de vie pour la faune.

La haie délimitant le périmètre bocager est elle-même entourée d'une zone pare-feu de 15 m de large régulièrement défrichée pour la protéger d'éventuels feux de brousse. »

Au sein de ces périmètres protégés, chacun des paysans bénéficiaires possède plusieurs parcelles qui comportent divers aménagements visant à améliorer l'infiltration de l'eau vers le sous-sol et à limiter l'érosion.

Deux diguettes bordant les coins les plus bas jouent un rôle de retenue de l'eau de ruissellement, mais assurent également un rôle anti-érosif en diminuant la distance et la puissance du ruissellement.

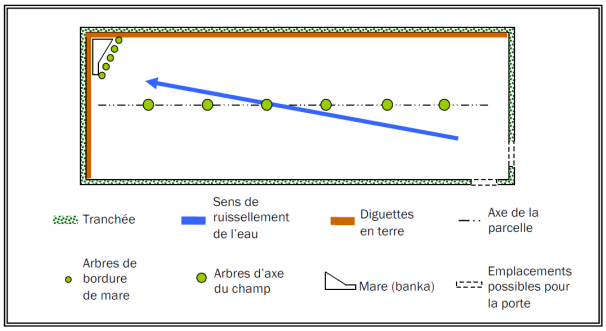
L'orientation des parcelles, et donc des diguettes, se fait donc de manière à les placer perpendiculairement à la direction du ruissellement.

En bas de chaque parcelle est placée une mare qui permet de récolter et stocker les eaux de ruissellement, qui peuvent ainsi s'infiltrer dans les couches profondes du sol.

L'eau restant en surface permet un arrosage d'appoint ou l'abreuvage du bétail lorsque la parcelle est en jachère pâturée.

La mare est bordée d'arbres du côté du champ, assurant une fonction de protection et de réduction de l'évaporation.

Au niveau de l'axe de la parcelle peuvent être plantés des arbres de haut fût — espèces fertilisantes ou apportant un revenu complémentaire — complémentaires des cultures.



Le bocage sahélien est un système qui s'accompagne de pratiques culturales très élaborées, issues de répertoires de techniques locales traditionnelles comme celles du Zaï ou plus récentes comme des demi-lunes. Cultiver en zaï consiste à creuser un trou dans le sol qui est amendé de matières organiques avant d'y semer la graine.

La cuvette ainsi formée permet de recueillir les eaux de ruissellement, de conserver l'humidité, de protéger les plantules du vent et de concentrer les nutriments dont la plante a besoin pour se développer.

Les zaï sont préparés en saison sèche et ensemencés au début de la saison des pluies. Ce système permet de multiplier les rendements par trois, de les sécuriser et de réduire la dépendance aux aléas climatiques.

«*Le zaï*, explique Henri Girard, *est associé à d'autres pratiques afin d'instaurer une agriculture durable dans cette zone sahélienne.*

La rotation des cultures permet d'éviter l'épuisement du sol et l'invasion des parasites et adventices liés à une culture donnée.

De plus, elle permet de sortir de l'agriculture sur brûlis devenue impossible du fait de l'augmentation de la population et de la raréfaction des terres. Mais la rotation des cultures va de pair avec la jachère.

C'est à dire, un temps de réparation du sol, où on laisse la végétation s'installer spontanément. Les plantes qui vont se développer sont celles capables de résoudre les carences du sol. Les techniciens de la ferme de Guiè recommandent la jachère pâturée.

Le passage du bétail et la fumure qu'il dépose sur place redonnent à la terre les éléments nutritifs dont elle a besoin pour être plus productive.

Les jachères sont délimitées par une clôture électrique solaire.

Le bétail trouve sa place dans cet équilibre du bocage sahélien. Afin d'éviter le surpâturage et le "broutage » des jeunes arbres par les troupeaux, ceux-ci paissent toujours sous la garde d'un berger ou dans des pâturages clos.

De plus, le bocage préserve les cultures des animaux.

En effet, la divagation permanente du bétail, comme c'est l'usage traditionnellement, ne permet pas à la végétation de se régénérer. Il est possible de limiter l'action destructrice d'un élevage extensif en délimitant des zones dédiées à l'élevage qui prennent en compte le nombre d'animaux à l'hectare.

Afin de garantir une nourriture de qualité toute l'année, la ferme de Guiè stocke le fourrage (foin et ensilage). Ainsi, le bétail en meilleure santé a une meilleure productivité et il est une entité complémentaire aux cultures.

Par exemple, le nettoyage de la jachère par le troupeau permet d'éviter l'écobuage. La nuit, le bétail dort dans un parc, ce qui permet de récupérer le fumier qui servira pour le compost.

Celui-ci est aussi fabriqué à partir des déchets verts. En effet, lors d'opérations de débroussaillage et d'entretien des haies, les végétaux sont broyés et compostés. »



REVERDIR LE DÉSERT JORDANIEN



Geoff Lawton, Australien très connu dans le milieu de la permaculture a, entre autres projets, mené une initiative de création d'une oasis autonome en Jordanie, au milieu du désert de Wadi Rum à 10 km au nord de la mer Morte et à 6 km à l'est de la frontière jordano-palestinienne.

Le climat et l'altitude de la région font probablement de ce site l'une des régions désertiques habitées les plus rudes du monde. Et c'est en grande partie pour cela que Geoff Lawton l'a choisi. « *L'idée était de montrer que si nous pouvons réussir ici, nous pouvons réussir partout et dans n'importe quel désert.* »

En quelques années, l'équipe animée par Geoff Lawton a réussi à transformer ce milieu hostile en milieu fertile grâce à des techniques ingénieuses permettant de récupérer la moindre goutte d'eau reçue ou sur le site.

La spécificité du désert est que l'humidité et les forts écarts de température entre le jour et la nuit y provoquent la rosée du matin sur les arbres. Ce phénomène permet potentiellement d'augmenter le volume d'eau recueilli de 80 %.

Reste qu'il fallait pouvoir recueillir cette eau pour pouvoir l'utiliser avant qu'elle s'évapore.

Afin de pouvoir utiliser cette eau issue de la condensation, un système complexe a été mis en place.

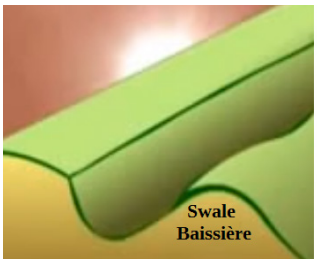
Le but fut tout d'abord de contrôler l'évaporation, en limitant l'impact du soleil, mais aussi du vent.

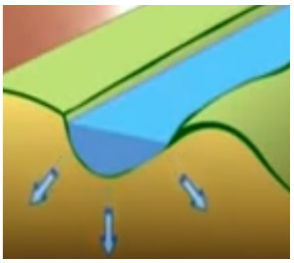
La solution ?

Des arbres et des plantes rampantes ont permis de couvrir le sol afin d'y retenir l'humidité tout en capturant les nutriments présents dans le vent.

Dans le même temps, l'implantation d'arbres du désert a apporté des matières organiques qui nourrissent le sol qui abrite les cultures.

L'équipe menée par Geoff Lawton a confectionné un système pour récolter la moindre goutte d'eau issue des précipitations en établissant des baissières.

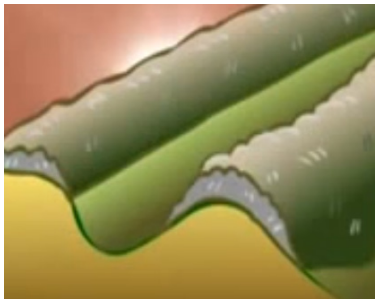




Sur 5 ha, l'eau est récoltée sur 1,5 km.

Quand le système est plein, un million de litres d'eau s'infiltrent dans le sol.

Il se remplit plusieurs fois par hiver.



Les talus sont paillés avec des déchets verts. Le paillis a une épaisseur de 50 cm/. Les talus mesurent deux mètres de large et le fossé a une profondeur d'environ 50 cm.

Une irrigation goutte à goutte a été installée sous le paillage. Du côté amont de la tranchée de récupération, des arbres d'espèces pionnières très vigoureuses ont été plantés, pour faire de l'ombre, fixer l'azote, réduire l'évaporation par le vent, structurer le sol et libérer de l'azote.





Du côté aval, des arbres fruitiers destinés à former l'étage supérieur ont été plantés.

Nadia Lawton, la femme de Geoff, a utilisé des techniques similaires pour concevoir le jardin de sa famille en Jordanie. Au début, le site était très sec. Ils ont creusé une rigole pour récupérer l'eau de pluie et ont fait passer les eaux grises des éviers dans la rigole.

La photo ci-dessous à gauche montre le jardin avant la plantation des arbres; celle de droite montre que l'année suivante, le même site était méconnaissable.





L'oasis fournit maintenant aux commerces des olives, des abricots, des pêches, du raisin et aussi des aubergines, des poivrons ou encore des champignons, qui au début ont suscité quelques inquiétudes chez les locaux qui n'en avaient jamais vu auparavant.





TRANSFORMER LES DÉSERTS MINÉRAUX URBAINS EN VILLES ÉPONGES



Inondation de Pékin en 2012, (AFP)

Le concept de « *sponge city* » : « *ville éponge* » initialement pensé par l'architecte Peter Cook dans les années 1970, qui imaginait une ville qui s'absorbe dans son paysage a été repris et modifié en Chine fin 2014 dans le cadre d'un programme national visant à faire en sorte qu'à l'horizon 2030, 80 % des zones urbaines du pays soient capables d'absorber et de réutiliser 70 % des eaux de pluie qui se précipitent sur elles.

Ce programme a été mis en œuvre après des évènements dramatiques survenus dans plusieurs métropoles du pays.

Le 21 juillet 2012, par exemple, Pékin a été frappée par des pluies torrentielles qui ont très vite submergé les routes et inondé les voies souterraines. Alors que le déluge se poursuivait, la capitale chinoise a sombré dans le chaos.

Cet épisode diluvien inédit depuis au moins 60 ans a fait 79 morts ; la plupart des victimes ont péri noyées dans leur véhicule ou ont été aspirées dans des canalisations souterraines. Les dommages ont atteint près de 2 milliards de dollars.

L'agronome et architecte paysagiste pékinois Yu Kongjian qui a réchappé de justesse à la catastrophe avait au début des années 2000 établi, une carte des zones à haut risque d'inondation de la capitale chinoise et proposé un « *modèle de sécurité écologique* » recommandant que ces terres ne soient pas urbanisées sans précaution et qu'elles soient plutôt utilisées pour absorber les eaux de pluie.

Les catastrophes de l'année 2012, auront réhabilité l'expertise en matière d'aménagement hydrologique de Yu Kongjian qui avait auparavant été ridiculisé pendant des années par les médias et les autorités chinoises qui le considéraient comme un penseur arriéré et l'avaient même qualifié d'élément subversif et d'espion américain pour s'être opposé à la construction de barrages, symboles de pouvoir et de progrès dans la Chine moderne.

Yu Kongjian qui conseillait de travailler avec l'eau, plutôt que de s'efforcer de la contrôler, était à l'avant-garde d'une « *école de pensée* » qui propose de rétablir les conditions de possibilité d'un cycle naturel de l'eau dans les environnements urbains.

Son cabinet d'architecture paysagère, Turenscape, qu'il a cofondé en 1998, crée des espaces flexibles permettant à l'eau de se répandre et de s'infiltrer, à la fois pour prévenir les inondations et pour être stockée en vue d'une utilisation ultérieure. Sa vision s'inspire de l'hydrologie na-

turelle qui a été niée en confinant étroitement les rivières avec des digues, en construisant des bâtiments ou des parkings là où l'eau veut s'attarder, ou en érigeant des barrages qui ont, à des degrés divers, asséché 333 rivières dans la région du Yangtze.

En essayant de résoudre un problème à la fois – inondations ici, pénurie d'eau là — l'approche technicienne du XXe siècle en matière de gestion de l'eau, a perdue la perception de la globalité des cycles hydrologiques et s'est minée elle-même. « *Le drainage est séparé de l'approvisionnement en eau ; la lutte contre les inondations est séparée de la résistance à la sécheresse* », écrivait Yu Kongjian en 2016 pour un article qu'il a présenté à un symposium de Harvard.

Dans la boîte à idées, de la nouvelle politique de gestion de l'eau figure celle de tirer parti des paysages urbains existants et de s'inspirer des cycles naturels de l'eau pour faire évoluer et/ou se substituer aux traditionnelles et coûteuses solutions de drainage artificiel des eaux.

Dans la ville de Wuhan qui fut pionnière en la matière, des jardins pluviaux, des toits végétalisés, des dispositifs de « *bio-rétention* » d'eau ont été aménagés, les trottoirs et les chaussées ont été redessinés pour faciliter le ruissellement de l'eau, et des revêtements poreux ont remplacé l'asphalte imperméable des voies routières.



Shanghai Houtan Park



Aménagement de la périphérie de Wuhan

Dans le sillage de la nouvelle politique de la gestion des eaux, les infrastructures de nombreuses villes comme Wuhan, Shanghai, Shenzhen… se sont « *verdies* »[1].

Un mouvement qui pourrait révolutionner l'aménagement urbain est en gestation. En son sein urbanistes, architectes, gestionnaires des eaux, hydrologues, écologues et ingénieurs s'associent pour promouvoir la restauration des cycles naturels de l'eau et fonder une nouvelle ingénierie « *biomimétique* » qui donne à l'eau assez d'espace pour qu'elle puisse s'étendre ou se contracter et pour ralentir son flot en préservant ou restaurant les plaines inondables et les marais, en exhumant les ruisseaux enterrés et créant des noues paysagères, des bassins de rétention, des parcs submersibles et des parkings perméables.

Les infrastructures « *vertes* » et « *bleues* » de ce nouvel art de vivre avec l'eau présentent une multitude d'intérêts avérés ou potentiels :

- réduire les risques, l'ampleur et les impacts destructeurs des inondations ;
- nettoyer les eaux grises ;
- favoriser la biodiversité ;
- limiter les effets des îlots de chaleur urbains ;
- multiplier les îlots de fraîcheur en période de canicule ;
- améliorer la qualité de l'air ;
- stocker en période pluvieuse et rendre disponible en périodes sèches d'importants volumes d'eau ;
- stocker du carbone.

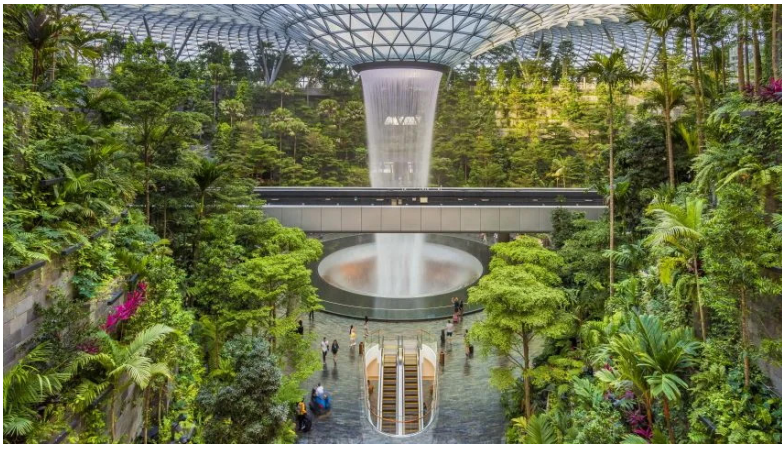
La connaissance de cette possibilité d'aménagement urbain par le plus grand nombre pourrait permettre d'imposer ce nouveau paradigme de l'eau en milieu urbain comme une norme[2].



Hôpital à Shenzhen



Aménagement urbain à Shenzhen



Aéroport de Singapour

1 Ville chinoise dont la gestion des eaux est en transition : Baicheng, Qian'an, Jinan, Hebi, Xixian, Zhenjiang, Jiaxing Chizhou Wuhan, Changde, Chongquing, Suining Nouvelle zone de Gui'an, Nanning, Pingxiang, Xiamen, Pékin, Tianjin Dalian, Qingyang Guyuan, Xining Shanghai, Ningbo, Fuzhou Shenzhen, Zhuhai, Yuxi Sanya…

2 Bibliographie : China's Sponge City construction: A discussion on technical approach https://www.researchgate.net/profile/Haifeng-Jia/publication/318993562_China's_sponge_city_construction_A_discussion_on_technical_approaches/links/5e7879844585157b9a546e26/Chinas-sponge-city-construction-A-discussion-on-technical-approaches.pdf
Case Studies of Sponge City Program in China https://www.researchgate.net/profile/Xiaoning-Li-9/publication/303362681_Case_Studies_of_the_Sponge_City_Program_in_China/links/59dd3ee2a6fdcc276fa2b39a/Case-Studies-of-the-Sponge-City-Program-in-China.pdf
Design of sponge city: Lessons learnt from an ancient drainage system in Ganzhou, China
Sponge city, ErQi sponge city final report https://d1rkab7tlqy5f1.cloudfront.net/Websections/Infrastructures%20and%20Mobility/Student%20projecten/Sponge%20City%20China/SCP_Final_report_nov2018.pdf
A new model framework for sponge city implementation: Emerging challenges and future developments http://ch.awrcenter.net/publication/uploadfiles/file/20201012/20201012160222_3940.pdf
Governance of the Sponge City Programme in China with Wuhan as a case study https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07900627.2017.1373637?needAccess=true



Parc Yanweizhou dans la ville de Jinhua aménagé par le cabinet Turenscape

POUR CONCLURE

UNE AUTRE FIN EST POSSIBLE…

Nous disposons aussi de millions d'alliés potentiels pour agir. Ce sont les arbres, les forêts, les plantes, les champignons, les vers de terre, les termites, les microorganismes du sol…

Eux seuls sont les bio et géo-ingénieurs des équilibres de la vie. Eux seuls savent à la fois capter, réguler, générer l'eau, mais aussi le dioxyde de carbone, l'oxygène, l'azote et tout ce qui est indispensable à la vie.

Soyons à leur écoute, soyons leur apprentis, nous avons tant à apprendre.

Que nous disent-ils ?

« Il n'y a qu'un seul processus par lequel nous pouvons assurer un climat et une atmosphère qui préserveront notre vie présente et à avenir et la vôtre aussi. Il s'agit de ce que vous appelez la photosynthèse, qui est la mère des cycles du carbone et de l'eau.

Notre avenir comme le vôtre dépend de la façon dont vous nous permettrez ou non de régénérer les sols, de les rendre poreux, d'en faire une éponge carbonée où l'eau, l'air et une foule d'êtres vivants circulent.

Mais, pour que nous puissions œuvrer à cette tâche, nous vous en prions, ne détruisez pas la peau de la terre, nous voulons dire les plantes.

Elles seules savent récolter la lumière du soleil et protéger les ingénieurs de la vie habitant le sol du rayonnement solaire toxique qui nous dessèchent, nous brûlent, nous tuent.

Les plantes sont essentielles pour fixer l'énergie solaire surpuissante, transformer le gaz que vous appelez CO_2 en matière vivante et générer de l'oxygène et de l'eau. Sachez qu'une fois que la synthèse de la lumière a permis de créer de la biomasse qui mérite bien le nom que vous lui avez donné, c'est ce que nous faisons de cette matière qui importe. Selon vos actions sur le sol vous induirez son oxydation rapide en CO_2 et l'oxygène nous brûlera, ou vous nous permettrez grâce aux champignons de la convertir en carbone organique dans le sol ? Il n'y a que deux possibilités.

Il n'y a pas d'autre choix.

Vous avez favorisé la voie de combustion et l'oxydation. Vous avez détruit les sols en les brutalisant. Vous nous avez empoisonnés à grand renfort de biocide, fongicide, pesticide, insecticide que vous aviez inventé d'abord pour éliminer vos semblables.

Comment allez-vous pouvoir produire la nourriture qui vous est nécessaire et pour avoir un environnement et un climat vivable sans notre concours ?

Vos civilisations peuvent prospérer, mais seulement brièvement si vous ne respectez pas les cycles naturels de la vie et de la mort auxquels vous et nous sommes assujettis. En revanche, si nous collaborons, nous pouvons même transformer les déserts issus de vos maladresses en milieux fertiles. C'est ce que nous avons fait il y a 420 millions d'années, et c'est ce que nous nous obstinons à faire avec une indéfectible constance depuis.

Voilà que vous vous inquiétez de l'augmentation des températures terrestres. Vous dites, du moins certains d'entre vous, qu'il faut réduire les émissions de gaz réchauffant l'atmosphère.

Mais, même si vous y arrivez, cela n'aura que peu d'effet si vous ne nous redonnez pas notre place de régulateur du vivant.

L'augmentation des gaz à effet de serre n'est qu'un signe parmi d'autres vous rappelant les conséquences du déboisement, du défrichement, de la construction de villes tentaculaires presque entièrement minérale, de la combustion à outrance du carbone que nous avions accumulé et transformé en charbon et en pétrole pendant des millions d'années.
Savez-vous que le simple fait de retourner le sol émet du dioxyde de carbone qui vous inquiète ?

Vous le voyez, le CO_2 que vous diffamez n'est pas à l'origine du problème. Le problème sont vos gestes, ceux par exemple qui ont forgé et ont manié, la hache, la houe ou la charrue et ont réduit à néant l'architecture subtile du vivant que nous avions construite.

Vous avez érigé des cathédrales de pierre, mais aucune ne rivalise avec nos édifices humiques où circulent air, eau, macro et microfaune, et où toutes les plantes sont connectées par des réseaux mycéliens.

Nous ne pouvons remédier l'altération flagrante des équilibres naturels de la Terre que si vous nous laissez jouer notre fonction.

Après vos comportements inconséquents, notre tâche peut paraître ardue.

Vous avez en effet franchi six des neuf limites que nous sommes capables de gérer d'ordinaire.

En conséquence, vous et nous n'avons plus d'autre choix que de nous allier pour parer à ce qui menace notre survie commune.

Ensemble nous pouvons encore être en mesure d'agir efficacement.

Nous aider devrait être désormais votre priorité, du moins si vous choisissez comme nous d'être des gardiens de la vie.»

CONCLUSION

Bien que cela ne fasse pas la une des médias, et ne soit pas un sujet de débat public, l'eau, sous forme de vapeur, est de loin le premier gaz à effet de serre. L'eau engendre de 60 à 80 % de l'effet de serre de la planète. La part du dioxyde de carbone (CO_2) est de 4,1 %, suivi par le méthane, les gaz fluorés, etc.

L'effet de serre, c'est oublié par les médias, est d'abord un dispositif protecteur de la vie.

C'est grâce à l'eau que la terre ne ressemble pas à la lune avec un gradient de 250 degrés entre le jour et la nuit. C'est grâce à l'eau que la température moyenne de la terre est propice à la vie. L'eau est le gaz à effet de serre qui permet cela.

L'eau, substance étonnante par la versatilité de ses formes, est le sang de la terre, et le carbone est sa structure. Si ne nous prenons pas soin de l'un et de l'autre, nous périrons.

Nos conversations et nos pensées sont hantées par les thèmes du réchauffement climatique et leur corollaire de canicules, d'inondations, d'incendies immaîtrisables, de destruction de la capacité des sols à être fertiles et nous n'arrivons pas à articuler les phénomènes qui balayent la stabilité climatique qui prévalait il ya quelques décennies. Nous entendons les mots «*effets de serre*», «*CO_2*», «*gaz à effet de serre*», et les utilisons généralement à notre tour sans bien comprendre ce qu'ils signifient.

Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre, et pourquoi a-t-il cet effet réchauffant ?

Une fois de plus, Emma Haziza nous aide à comprendre le dessous des cartes et des mots :

«Un rayonnement lumineux incident du soleil, qui vient taper le sol, va rebondir. En rebondissant, il rencontre des molécules sur son chemin. Soit il s'agit de molécules à "deux têtes" comme l'azote (N_2), l'oxygène (O_2) qui vont être éjectées sur la trajectoire du rayon, soit il rencontre des molécules à "trois têtes" comme la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2)..., le rayon lumineux va faire vibrer et déstabiliser ces dernières molécules. Ces vibrations entraînent un réchauffement, et de proche en proche les vibrations qui se transmettent d'une molécule à l'autre vont réchauffer un ensemble de molécules jusqu'à arriver au sol et on a des masses d'air qui se réchauffent.»

Lorsque la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, quels qu'ils soient, augmente, la température de la Terre s'élève en conséquence. L'élévation de la température de la Terre, qu'elle que soit son origine (plus grande concentration de GES dans l'atmosphère, albédo plus important des sols par manque de végétation pour tamponner le rayonnement solaire..., cela augmente l'évaporation de l'eau et des terres).

Comme l'air plus chaud contient plus d'humidité, sa concentration en vapeur d'eau augmente.

Cela se produit parce que la vapeur d'eau ne se condense pas et ne se précipite pas aussi facilement à des températures plus élevées. La vapeur d'eau, dont le volume est plus important, absorbe encore plus la chaleur rayonnée par la Terre qui peut moins facilement s'échapper dans l'espace.

Cela réchauffe encore plus l'atmosphère, ce qui entraîne encore plus de vapeur d'eau dans l'atmosphère. C'est ce que les scientifiques appellent une «*boucle de rétroaction positive*».

Des scientifiques estiment que cet effet fait plus que doubler le réchauffement qui se produirait en raison de la seule augmentation du dioxyde de carbone.

Cette boucle de rétroaction positive est alimentée, d'une part, par la déforestation, les modes d'exploitation agricole dominants des sols et l'urbanisation qui empêchent l'eau des précipitations de s'infiltrer dans les sols et favorisent son évaporation immédiate, et d'autre part, par l'exploitation des masses d'eau souterraine fossiles à la manière de l'exploitation du pétrole, pour irriguer des zones de culture comme la Californie, le Chili, l'Inde, le Sahara, le pourtour méditerranéen, qui injecte de grands volumes d'eau supplémentaires dans l'atmosphère parce que sa majeure partie va très vite s'évaporer ou ruisseler et ne rejoindra jamais les nappes phréatiques dont elle est issue qui, tout comme celles de pétrole se sont formées à l'échelle des temps géologiques.

Nous avons pu voir que la perturbation des cycles de l'eau indispensable au maintien de conditions favorables à la vie n'est pas irréversible.

Le moyen de les restaurer ne présuppose aucune haute technologie que resterait à inventer, mais seulement une grande intelligence des équilibres de la biosphère.

Nous disposons de savoirs et de pratiques ancestrales et de toutes les connaissances scientifiques pour agir.

Nous disposons de millions d'alliés potentiels pour agir, ce sont les arbres, les forêts, les plantes, les microorganismes du sol.

Eux seuls savent à la fois capter, réguler, générer l'eau, mais aussi le CO_2, l'azote et tout ce qui est indispensable à la vie.

Pour clore cette brochure, je citerai de nouveau Emma Haziza :

> *« Cela fait des années que je me focalise sur les solutions, les solutions, les solutions. Mais vous savez quoi ? Il y a des solutions partout (il y a des solutions pour s'adapter au risque inondation, pour s'adapter au risque sécheresse, pour recréer des cycles de l'eau à petite échelle…).*
>
> *Comme le dit Bettina Laville, le problème n'est pas de trouver les solutions, mais de trouver les solutions pour mettre en œuvre ces solutions. »*

Et je laisserai le mot de la fin à Hervé Coves, dont les recherches et les conseils bibliographiques ont stimulé et rendu possible la rédaction de cette documentation.

> *« Il nous faut apprendre à récolter le soleil et cultiver l'eau pour retrouver le chemin de la fécondité. »*



Hervé Coves



ALLER PLUS LOIN...

• Principes de culture, récolte et fructification de l'eau en permaculture
https://lavierebelle.org/principes-de-culture-recolte-et?lang=fr

• La sécheresse est-elle un état naturel ?
https://lavierebelle.org/la-secheresse-est-elle-un-etat?lang=fr

• Introduction aux techniques traditionnelles de gestion et de recueil des eaux de pluie
https://lavierebelle.org/introduction-aux-techniques?lang=fr

• Techniques traditionnelles I. Ralentir, étaler, retenir, faciliter l'infiltration de l'eau
https://lavierebelle.org/introduction-aux-techniques?lang=fr

• Techniques traditionnelles II. Cultiver en creux pour créer des oasis
https://lavierebelle.org/techniques-traditionnelles-ii?lang=fr

• Cultiver sur l'eau — Jardins flottants du Bangladesh
https://lavierebelle.org/jardins-flottants-du-bangladesh-12?lang=fr

• Leçons dogon de récolte de l'eau et de gestion de la fertilité des sols
https://lavierebelle.org/lecons-dogon-de-recolte-de-l-eau?lang=fr

• Composer des jardins en gaufres et collecter les crues d'orage.
L'art Zuñi de l'agriculture en milieu aride
https://lavierebelle.org/composer-des-jardins-en-gaufres-et?lang=fr

• Recréer des variétés végétales résistantes aux maladies et tolérantes au stress hydrique
https://lavierebelle.org/comment-re-creer-des-varietes?lang=fr

• Purifier l'eau avec les ressources du milieu
https://lavierebelle.org/purifier-l-eau-avec-les-ressources ?

• Irriguer avec des artefacts en argile cuite
https://lavierebelle.org/irriguer-avec-des-artefacts-en?lang=fr

• Ollas : irriguer avec des jarres enterrées
https://lavierebelle.org/irrigation-avec-des-jarres?lang=fr

• Wicking bed. Culture en jardinière irriguée par capillarité
https://lavierebelle.org/wicking-bed?lang=fr

• Évaluation de l'efficacité du système wicking bed
https://lavierebelle.org/evaluation-de-l-efficacite-du?lang=fr

VIDÉOTHÈQUE

• Les cycles de l'eau et du carbone sont intimement liés
https://www.youtube.com/watch?v=CK7-LJ0LOeY&t=1s

• Arbres et forêts & de l'eau, par Ernst Zürcher
https://www.youtube.com/watch?v=J-gjTWkmH9Vw&list=RDCMUCUaPi-JJ2wH9CpuPN4zEB3nA&start_radio=1

• François Mulet : L'activité de l'eau
https://www.youtube.com/watch?v=d7ZjkiDuLwY

• Geoff Lawton – Greening the Desert
https://www.youtube.com/watch?v=2xcZS7arcgk

• Geoff Lawton – Behind Greening the Desert
https://www.youtube.com/watch?v=keQUqRg2qZ0

• Yacouba Sawadogo – The Man Who Stopped The Desert
https://www.youtube.com/watch?v=KOIWJFzx68E

• Ernst Götsch
https://www.youtube.com/watch?v=gSPNRu4ZPvE

• Zephaniah Phiri Maseko - The Water Harvester
https://www.youtube.com/watch?v=ieqYZaT0JwA

• John D. Liu – The Lessons of the Loess Plateau
https://www.youtube.com/watch?v=bjLV_aVRUmQ

• Les crises de l'eau — Dialogue avec l'hydrologue Emma Haziza
https://www.youtube.com/watch?v=xrfQiLfjvsg

Restaurer la Terre —La décennie à venir
https://www.fao.org/3/cb1600fr/cb1600fr.pdf

RÉPONSES DE GÉRARD DUCERF

Eau et états de sols
https://www.youtube.com/channel/UCfdL-HJ-XnXkhTfnglhTogwg

Hydromorphisme, origines, problèmes et solutions
https://www.youtube.com/watch?v=SrBPcVw6Biw

Agroécologie sécheresse et vie microbienne des sols
https://www.youtube.com/watch?v=z_5wA8m_HuI

BIBLIOTHÈQUE

RESSOURCES FRANCOPHONES

Sécheresse : les nouvelles batailles de l'eau
https://www.franceculture.fr/emissions/le-temps-du-debat/secheresse-les-nouvelles-batailles-de-leau

Les batailles de l'eau. Agriculture : le risque de la pénurie
https://www.franceculture.fr/emissions/cultures-monde/les-batailles-de-leau-44-agriculture-le-risque-de-la-penurie

Marcel Violet Ingénieur A et M Ouvrage écrit avec la collaboration de Michel Remy Christian Beau L'énergie cosmique au service de la santé ou Le secret des patriarches 5e édition revue et augmentée Le Courrier du Livre, 1979
https://eaudossier.files.wordpress.com/2018/02/lesecretdespatriarches.pdf

RESSOURCES ANGLOPHONES

Doug Crouch, 'Hydrological Cycle: Half and Full', PNAS 2021 Vol. 118 No. 20
https://treeyopermacultureedu.com/chapter-7-water/hydrological-cycle-half-and-full/

Restoring the Earth – The next decade
https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.2024492118

Brad Lancatser – Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond Volume 1, 2, 3 Water-Harvesting Earthworks (2010, Rainsource Press)

Comprendre les cycles hydrologiques et cultiver l'eau pour restaurer la fécondité des sols et prendre soin du climat

Documentation éditée par l'association *ISI - Initiatives & Solutions Interculturelles*.

ISI - INITIATIVES ET SOLUTIONS INTERCULTURELLES

L'association *ISI - Initiatives et Solutions Interculturelles*, constatant à la fois la richesse des connaissances scientifiques accumulées ainsi que la multiplicité et la diversité des pratiques et des savoirs traditionnels disponibles, note que :

– Ce ne sont pas les solutions qui manquent mais la possibilité de les mettre en œuvre à une échelle pertinente ;
– Ces solutions sont généralement dispersées, non coordonnées et pas suffisamment partagées ni vulgarisées ;
– La transposition de ces solutions d'un contexte à un autre n'est jamais un simple transfert de connaissance technique ;
– L'adoption de toute pratique ou technique dépend d'un contexte social et culturel donné, de traditions d'entraide et de coopération locales, de modalités de prise de décisions et de gestion collective des ressources et des usages qui font sens pour les communautés concernées.

Considérant qu'il est nécessaire de trouver des modalités pertinentes de diffusion des savoirs et des expériences, de mutualisation des intelligences et de partage des solutions éprouvées pouvant être adaptées localement aux différents contextes (culturels, sociaux, géographiques…) ;

L'association ISI se donne pour objectifs principaux :

– d'une part, de faciliter les liens et les échanges entre les personnes, les groupes et les communautés qui, confrontés à des problèmes, ont su inventer des pratiques et des techniques qui ont abouti à des solutions éprouvées ;
– d'autre part, de contribuer à la reconnaissance de ces solutions ;
– et enfin, de permettre leur appropriation par le plus grand nombre, leur adaptation à d'autres contextes et leur changement d'échelle.

L'association ISI prend en compte la dimension interculturelle du partage des savoirs et des pratiques et met en place des dispositifs facilitant la communication entre acteurs issus de mondes hétérogènes, afin de dissiper les difficultés qu'ils peuvent rencontrer à œuvrer ensemble efficacement.

À partir d'une réflexion commune avec les personnes, les communautés et les organisations concernées par les projets, elle appuie la co-construction d'une intelligence collective de la situation.

Les objectifs suivants entrent ainsi dans le cadre de nos intentions :

– L'identification, la reconnaissance, la mise en réseaux d'initiatives locales ;
– L'empowerment et l'implication des communautés (dans leur diversité: genre, âge, niveaux sociaux et éducatifs) ;
– La facilitation du dialogue et de la coopération entre milieux et cultures hétérogènes ;
– Le partage d'outils, méthodes et techniques facilitant la construction et le partage de solutions respectueuses des milieux et des personnes ;
– La collaboration et l'appui à des initiatives et projets concourant aux mêmes buts que ceux de l'association ISI.

www.interculturelles.org

ISI Initiatives Solutions Interculturelles

https://interculturelles.org/project/cultiver-l-eau/

ISI Initiatives Solutions Interculturelles

ISI —Initiatives et Solutions Interculturelles
www.interculturelles.org