

Évapotranspiration

L'**évapotranspiration** (ET) est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. Elle se définit par les transferts vers l'atmosphère de l'eau du sol, de l'eau interceptée^[1] par la canopée et des étendues d'eau. La transpiration se définit par les transferts d'eau dans la plante et les pertes de vapeur d'eau au niveau des stomates de ses feuilles. Un changement de végétation peut se traduire par des changements de l'évapotranspiration (moyenne ou maximale)^[2] et par des changements significatifs du cycle de l'eau et de l'engorgement du sol ou du niveau du plafond de la nappe superficielle^[3], mais dans les cas où la végétation est dense (forêt, mégaphorbiaie), il faut aussi tenir compte de leur participation aux eaux météoritiques dont une partie retournera dans l'écosystème (dont sous forme de rosée). Elle modifie ou explique certains microclimats et a des effets sur le climat à échelle biogéographique^[4]. C'est une « grandeur » qui intéresse aussi la pratique de l'hydrologie^[5].

Le concept d'évapotranspiration et ses mesures sont apparus dans les années 1950^[6]; il est important pour expliquer et quantifier les transferts d'eau dans les écosystèmes, pour calculer les besoins en eau des forêts, cultures agricoles^[7] et plus globalement pour la gestion de l'eau des espaces végétalisés naturels ou semi-naturels, ou encore pour estimer l'importance de bulles de chaleur urbaines^[8].

On distingue l'« évapotranspiration réelle » de l'« évapotranspiration potentielle »; la première est l'eau réellement dissipée dans l'atmosphère sous forme de vapeur alors que la seconde (évapotranspiration potentielle) est « l'eau susceptible d'être perdue dans les mêmes conditions quand elle n'est plus facteur limitant »^{[9],[10]}.

1 Processus de l'évapotranspiration

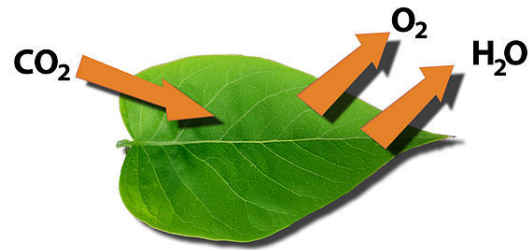
1.1 Évaporation

Article détaillé : Évaporation.

L'évaporation de l'eau est le passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène est donc une vaporisation progressive. Lorsqu'il existe un volume libre au-dessus d'un liquide, une fraction des molécules composant le liquide est sous forme gazeuse. À l'équilibre, la quantité de matière sous forme gazeuse définit la pression

de vapeur saturante qui dépend de la température. Lorsque la pression partielle de la vapeur dans le gaz est inférieure à la pression de vapeur saturante et que celle-ci est elle-même inférieure à la pression totale ambiante, une partie des molécules passent de la phase liquide à la phase gazeuse : c'est l'évaporation, qui demande de fournir la chaleur latente correspondante, ce qui refroidit le liquide.

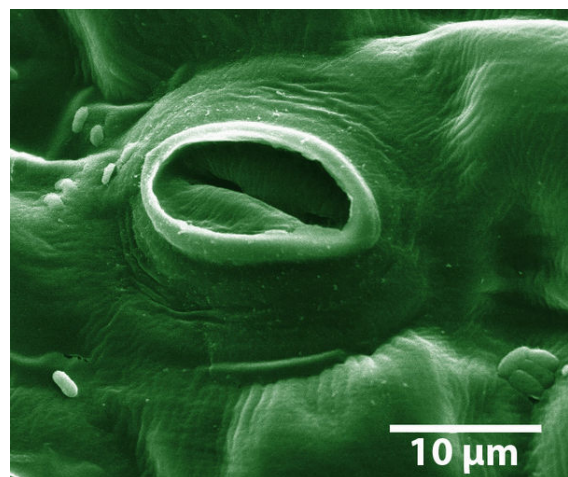
1.2 Transpiration végétale



Échanges au niveau d'une feuille : Du gaz carbonique (CO₂) est absorbé. De l'oxygène (O₂) et de l'eau (H₂O) sont rejetés.

Article détaillé : Transpiration végétale.

Chez les plantes, la transpiration est le processus continu



Un stomate ouvert sur une feuille de plant de tomate (image colorée de microscope électronique)

causé par l'évaporation d'eau par les feuilles et la reprise qui y correspond à partir des racines dans le sol. La transpiration est le principal moteur dans la circulation

de la sève et se produit essentiellement au niveau des stomates. La régulation de leur ouverture influence donc directement l'intensité de la transpiration.

Le rôle de la transpiration chez les végétaux est multiple : elle est le moteur de la circulation de la sève brute dans le xylème, elle favorise dans une certaine mesure le rafraîchissement des plantes et elle permet le transfert des sels minéraux aux endroits où la plante en a besoin, principalement dans les feuilles qui sont le siège de la photosynthèse.

La quantité d'eau rejetée dans l'atmosphère par la transpiration des plantes est très importante. À titre d'illustration, un hectare de hêtres rejette environ 25 t d'eau pendant la saison de végétation, et un hectare de forêt tropicale humide en évapotranspire bien plus encore (1530 mm environ +/- 7% selon les bassins, en Guyane, sous une pluviométrie de 2000 à 4000mm selon la mesure faite par le bilan hydrologique^[11] ; résultats proches de ceux de Madec obtenus avec la méthode de Thornthwaite en 1963^[12]). Cela explique le rôle joué par les grandes formations végétales, notamment les forêts sur le cycle de l'eau et sur le climat régional et mondial.

“L'appel transpiratoire” est un des moteurs de la circulation de la sève brute (il existe aussi la poussée raculaire). Lors de la photosynthèse les stomates s'ouvrent afin de laisser rentrer du CO₂. Il y a alors mise en contact de la solution des feuilles avec l'air extérieur. La différence entre le potentiel hydrique atmosphérique et celui des feuilles induit la sortie de l'eau (présente dans les feuilles) dans l'atmosphère. La pression relative dans le xylème diminue et devient plus faible que la pression atmosphérique. Le xylème est alors sous tension, ce qui permet la montée de la sève brute.

1.3 Facteurs d'influence

De nombreux facteurs physiques, biologiques et météorologiques influencent l'évapotranspiration, dont notamment :

- le type de plante, le stade de croissance et maturité de la plante, la hauteur de la plante, la profondeur des racines, le stress hydrique (En 2010, dans la revue *Nature*, certains auteurs observent une tendance à une diminution générale de l'évapotranspiration dans les zones cultivées, par manque d'eau^[13], l'évapotranspiration est une donnée qui intéresse la prospective agricole et climatique, en Inde par exemple^[14]) ;
- le taux de couverture végétale (ou paillage) du sol, la densité du feuillage, l'eau de pluie retenue sur le feuillage ;
- les radiations solaires^[15], la réverbération sur le sol et les plantes ;

- le contexte thermohygrométrique (humidité + température de l'air), la pression atmosphérique et le vent ;
- l'humidité et la température du sol et l'eau disponible dans le sol ;
- la composition du sol (argile, sable...) et ses capacités de rétention, drainage et percolation...

2 Importance de l'évapotranspiration



2.1 Cycle de l'eau et influence sur le climat

Sur une majorité de bassins, les pertes d'eau par évapotranspiration représente la partie la plus importante du bilan d'eau. Dans les espaces continentaux, plus de 60% de l'apport pluviométrique serait ainsi dissipé par évapotranspiration^[16].

Article connexe : Cycle de l'eau.

2.2 Évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle et réelle varient considérablement selon les écosystèmes et parfois selon les saisons, dont en

- Milieu tempéré ;
- Milieu aride ;
- Milieu urbain ;
- Milieu cultivé (éventuellement irrigué et/ou drainé...)

2.3 Agronomie et cultures agricoles

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. Votre aide est la bienvenue !

Toutes les plantes ont besoin d'eau. Certaines en évapotranspirent beaucoup, d'autres peu. En génie biologique, on exploite cette propriété pour assécher des terrains humides et marécageux en plantant des peupliers ou des saules en climat tempéré. Certaines plantes semi-aquatiques, dites palustres ou hydrophytes évapotranspirent beaucoup durant leur période de croissance^[17]. D'autres accumulent l'eau dans leurs tissus, l'évapotranspiration pouvant alors être en partie décalée dans le temps ; ce sont par exemple les sphaignes des tourbières.

En [climat tropical], on utilise des plantes qui évaporent peu et qui forment une voûte avec leurs branchages (des palmiers) afin de pouvoir cultiver à leur pied des plantes qui transpireraient plus si elles étaient en plein soleil, des orangers, des citronniers, des légumes, des plantes parfumées. On crée ainsi artificiellement sous les palmiers un « microclimat » favorable à des plantes cultivées.

2.4 Le cas particulier des TCR et TCCR

Les TCCR (taillis à très courte rotation) ou certains TCR (taillis à courtes rotations) utilisent des essences faciles à cloner à croissance très rapide. Ces essences poussent normalement à l'état sauvage dans des zones humides où l'eau ne manque pas. Il s'agit de saules ou de peupliers, deux essences qui évapotranspirent beaucoup en été, la période où l'eau risque le plus de manquer ; « typiquement 500 mm/an (pour les peupliers), soit plus qu'une culture traditionnelle (350 - 390 mm/an) ». le TCCR peut alors « aussi être à l'origine d'un ralentissement du drainage de l'eau dans le sol, de l'ordre de 80 mm par an (Hall, 1996). Tout cela est dû à la conductance stomatique élevée des feuilles de TtCR, à une absence de réaction vis-à-vis d'un déficit hydrique atmosphérique, ainsi qu'à une réponse différée à un déficit en eau du sol. Cette évapotranspiration élevée combinée au fait que le TtCR supporte des quantités d'eau dans le sol plus importantes que la plupart des autres cultures a pour conséquence qu'il peut être cultivé dans des sols forts humides (Dufey, 1999). Cela aura pour effet d'assécher le sol et il faut prêter attention à ne pas cultiver du TtCR sur un terrain dont la valeur écologique dépend de l'humidité de celui-ci (par exemple une prairie humide)^[18].

3 Diverses expressions de l'évapotranspiration

- Unités de mesure et ordres de grandeurs :

Comme pour la mesure des précipitations, l'unité est le millimètre de hauteur d'eau. 1 mm correspond à 1 litre par mètre carré ou à 10 mètres cubes par hectare. L'évapotranspiration réelle peut atteindre 4 à 6 mm/jour en plein été en zone tempérée européenne et 6 à 8 mm/jour en zone méditerranéenne.

Plusieurs concepts supplémentaires ont été ajoutés pour préciser les estimations de l'évapotranspiration. Ces concepts ont des définitions variables selon les auteurs^[19].

3.1 Évapotranspiration réelle (ETr) et potentielle (ETp)



Pour la végétation des déserts chauds, l'évapotranspiration potentielle (ETp) est très importante en raison de la chaleur et l'ensoleillement.

Mais l'évapotranspiration réelle (ETr) est très faible, car le manque d'eau disponible pour le sol et les plantes (sécheresse) est un facteur limitant.

La notion d'évapotranspiration potentielle (ETP) est couramment opposée à l'évapotranspiration réelle (ET ou ETR, anglais : *actual evapotranspiration ETa*).

L'évapotranspiration réelle désigne la quantité exacte d'eau évapotranspirée par une couverture végétale réelle. C'est une donnée impossible à mesurer à l'échelle d'une parcelle ou d'une région.

À l'opposé, l'évapotranspiration potentielle est une valeur calculée par des formules mathématiques^[20]. L'ETp est ainsi l'objet de définitions variées, selon les auteurs et les méthodes de calcul employées. Cette notion de consommation potentielle en eau a été introduite par Thornthwaite en 1948, puis reprise par Howard Penman dans sa formule de calcul (1948)^[21].

En 1956, Penman (1956) définit l'ETp comme : « l'évaporation d'une pelouse rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau ». Selon les auteurs et les méthodes, différents paramètres météorologiques, physiques ou biologiques sont inclus ou non dans la définition de l'ETp : par exemple l'espèce végétale, la constance des flux d'énergies, l'ouverture des stomates, la constance de l'humidité relative^[21]...

Ces deux notions E_{Tr} et E_{Tp} sont utiles et nécessaires pour étudier les bilans de circulation de l'eau et notamment pour déterminer les besoins en eau des cultures ou calculer l'« effet oasis »^[22] d'une zone où l'évapotranspiration est plus importante (qui peut être une zone urbaine). Les plantes de milieux arides peuvent fortement réduire leur évapotranspiration quand elles manquent d'eau. Les plantes des zones tropicales pluvieuses ne le peuvent généralement pas.

3.2 Évapotranspiration de référence (E_{To})



Luzerne cultivée

L'évapotranspiration de référence (E_{To}) est un concept utilisé dans différentes méthodes d'estimation. C'est une valeur d'évapotranspiration pour une végétation choisie, dans des conditions hydriques réelles, permettant ensuite de déduire l'évapotranspiration pour d'autres couverts végétaux. Cet usage pratique d'une culture de référence est lié à la faible variation de l'évapotranspiration potentielle selon les différents végétaux, dans de mêmes conditions climatiques.

Selon les climats et méthodes d'estimation, n'importe quel espèce végétale peut servir de référence. Typiquement, les plants de référence sont de l'herbe (gazon) ou de la luzerne cultivée (*alfalfa*) de faible hauteur, en raison de méthodes de calcul développées généralement pour les besoins de l'agriculture^[19].

3.3 Évapotranspiration maximale (E_{Tm})

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. Votre aide est la bienvenue !

E_{Tm} : Évapotranspiration Maximale. C'est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif, dans des conditions climatiques données, prise en compte par l' E_{Tp} . C'est une correction de l' E_{Tp} en fonction du couvert végétal. $E_{Tm} = K_c \times E_{Tp}$, K_c étant le coefficient cultural. Pour déterminer le coefficient cultural, Christian de Pescara propose la méthode suivante : il faut conduire la culture à l' E_{Tm} que l'on peut

déterminer par un appareil calculant au-dessus de la parcelle l' E_{TR} ou par un lysimètre. Alors nous avons $E_{TRmax} = E_{Tm}$ et nous calculons : $K_c = E_{TRmax}/E_{Tp}$. Ainsi nous pouvons calibrer les coefficients culturaux K_c .

4 Estimation de l'évapotranspiration

En complément de la pluviométrie, c'est un paramètre majeur des études bioclimatiques^[23] et de certaines études d'impact.

Il est aisé pour les chercheurs de mesurer l'évapotranspiration d'une plante ou d'une surface végétalisée de petite dimension (au moyen d'une chambre de transpiration portable par exemple^[24]). Mais cela devient difficile à l'échelle d'un arbre, d'une forêt, d'une roselière d'une parcelle de culture ou d'une région géographique. Il faudrait idéalement aussi tenir compte du pouvoir plus ou moins important d'interception de la pluie^[25] et des autres eaux météorologiques (brumes, rosées, neige, givre...). On utilise alors des méthodes empiriques ou la modélisation.

Un grand nombre de méthodes d'évaluation théoriques ou empiriques ont été définies depuis le milieu du XX^e siècle par les scientifiques (avec souvent des problèmes de calibration locale les rendant peu valides dans d'autres régions). Les spécialistes distinguent communément trois approches distinctes :

- Les modèles basés sur des facteurs agronomiques et météorologiques
- Les modèles basés sur l'équilibre des masses d'eau
- Les modèles basés sur l'équilibre des flux énergétiques

Ces modèles doivent toujours être utilisés avec prudence et en tenant compte de leurs limites méthodologiques, notamment en matière de sylviculture et de bioclimatologie tropicale^[26].

4.1 Calcul des facteurs agronomiques et météorologiques

4.1.1 Estimation par bac d'évaporation

Une mesure grossièrement approchée de l'évapotranspiration (dite « pan evaporation » par les anglophones^[27]) peut être approchée de manière simplifiée par des mesures réalisées avec un bac d'évaporation rempli d'eau. En l'absence de pluie, la variation du niveau d'eau dans le bac est supposée proportionnelle à l'évapotranspiration, car l'eau du bac est soumise aux mêmes conditions climatiques que



Bac d'évaporation de classe A avec cage de protection et anémomètre

les plantes et le sol : rayonnements (solaire), vent, température et humidité^[27].

Cette relation simple est formulée par^[27] :

$$ET_p = K_{bac} * E_{bac}$$

- ET_p l'évapotranspiration potentielle calculée (en mm)
- K_{bac} le coefficient du bac
- E_{bac} la mesure d'évaporation dans le bac (en mm).

Néanmoins de nombreux facteurs distinguent les conditions d'évaporation du bac et l'évapotranspiration du sol et des plantes (capacité du bac d'emmagasiner de la chaleur, les turbulences aériennes...). Ces aspects divergents sont pris en compte pour la mise en place des bacs (taille et forme du bac, choix couleur et matériaux...), et par des coefficients correcteurs plus complexes (définis par facteurs climatiques et géographiques)^[27]. Selon la FAO, la méthode des bacs d'évaporation donnerait des estimations « acceptables », avec un correct emplacement des bacs et pour des estimations sur des périodes supérieures à 10 jours. Selon des études de l'ASCE, en comparaison d'autres méthodes de calcul, la méthode des bacs s'avèrent généralement « irrégulière et inconstante »^[28].

4.1.2 Modélisation de Penman et Monteith



Un capteur de température et humidité au-dessus d'une parcelle de culture.

La modélisation dite « Penman-Monteith » est très utilisée et considérée comme le modèle offrant « les meilleurs résultats et le minimum d'erreurs » selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture^[29] et présentant des résultats « exacts et constants » pour les climats tempérés, humides et arides. Avec ce modèle, la couverture végétale est considérée comme un ensemble homogène et l'évapotranspiration est considérée de manière « verticale », comme une succession de résistances et régulations empêchant l'eau de s'évaporer : la résistance du sol, des racines, des stomates des feuilles, du couvert, etc^[30].

La formule complexe de Penman-Monteith (1965) incorpore de nombreux paramètres, qui sont mesurables ou bien calculables à partir de données météorologiques et agronomiques. Les données météorologiques utilisées comportent par exemple, la variations de température, d'humidité et de pression atmosphérique, la latitude, altitude, durée d'ensoleillement, force du vent. Les paramètres agronomiques comportent l'albédo et la conductivité stomatale des plantes, la hauteur des plantes, le type de sol...

$$ET_p = \frac{\Delta R_n + \rho_a c_p (\delta e) g_a}{(\Delta + \gamma (1 + g_a / g_s)) L_v}$$

Avec pour paramètres :

ET_p = Evapotranspiration potentielle (disponibilité d'eau dans le sol et les plantes)

Δ = Variation de saturation de l'humidité selon la température de l'air. (Pa K⁻¹)

R_n = irradiance nette (W m⁻²) du flux d'énergies extérieures

c_p = Capacité thermique de l'air (J kg⁻¹ K⁻¹)

ρ_a = Densité de l'air sec (kg m⁻³)

δe = déficit de pression de vapeur ou *specific humidity* (Pa)

g_a = Conductivité hydraulique de l'air (m s⁻¹)

g_s = Conductivité des stomates (m s^{-1})

γ = Constante psychrométrique ($\gamma \approx 66 \text{ Pa K}^{-1}$)

4.1.3 Modélisation des disponibilités de l'eau

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. Votre aide est la bienvenue !

L'évapotranspiration réelle (ET) est calculée ensuite à partir de la mesure des disponibilités de l'eau dans le sol et les racines. Cette disponibilité est mesurée à partir de l'humidité du sol et les caractéristiques physiques du sol et des racines — ou bien calculée d'après une modélisation des réserves d'eau (calcul d'infiltration, ruissellement et percolation selon les précipitations).

En comparaison du calcul des équilibres énergétiques (voir section suivante), cette méthode de calcul permet de préciser l'évapotranspiration sur des périodes courtes (durée inférieure à 1 heure) ; mais la modélisation impose des mesures complexes et coûteuses pour déterminer les paramètres physiques. De même de petites erreurs dans l'évaluation des disponibilités d'eau dans le sol impliquent de grandes erreurs d'estimation de l'ET réelle^[30].

Articles connexes : Teneur en eau (milieux poreux) et Stress hydrique (écologie).

4.1.4 Calcul d'évapotranspiration de référence (ET_o) et culturale (ET_c)



Le gazon sert communément de couverture végétale de référence (ET_o) pour les climats tempérés.

L'évapotranspiration d'une couverture végétale spécifique peut ainsi être calculée directement, à partir des formules combinant le modèle de Penman-Monteith et la disponibilité de l'eau. En pratique, l'évapotranspiration est généralement calculée en fonction d'une culture de référence (ET_o).

Soit une évapotranspiration de référence (ET_o), par exemple pour une parcelle d'herbe haute de 12 cm suffi-

samment hydratée^[31] calculée avec la formule Penman-Monteith. À partir de cette ET_o est ensuite calculée l'évapotranspiration pour une culture spécifique (ET_c), par exemple un champ de blé.

Avec une formule simplifiée, ET_c dépend d'un facteur culture (K_c) lié aux plantes (espèces végétales, profondeur racines, état de croissance...) et d'un facteur stress (K_s) lié aux spécificités du terrain (composition du sol, stress hydrique, protections contre vent et évaporation, espacement des plants, fréquence d'arrosage...). Ce calcul de ET_c est souvent présenté sous l'équation simplifiée :

$$ET_c = K_c * K_s * ET_o$$

4.1.5 Autres équations

- l'équation originale de Penman (1948) était l'une des plus notoire, mais elle nécessite des calibrages locaux (fonction vent) pour des résultats satisfaisants.
- Équations basées sur la température : Thornthwaite (1948), Hamon (1963), Hargreaves-Samani (1985)^[19]
- Équations basées sur la radiation : Turc (1961), Makkink (1957), Priestley-Taylor (1972)^[19]
- Équation de Blaney-Criddle (**en anglais**) : formule simpliste basée sur la température moyenne et la durée moyenne d'ensoleillement.

4.2 Calcul des masses d'eau

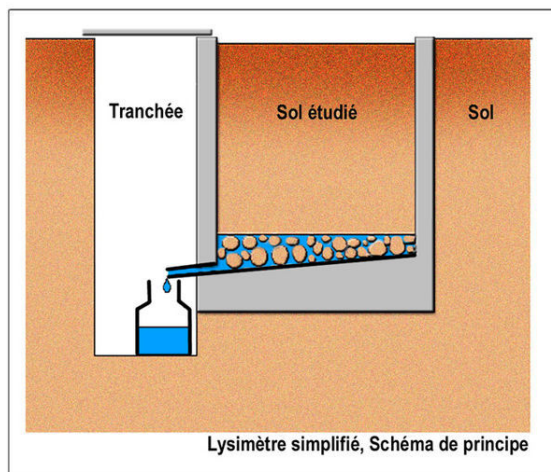
4.2.1 Bilan hydrologique

L'évapotranspiration peut être estimée à partir de l'équation d'équilibre de l'eau d'un bassin de drainage (S) :

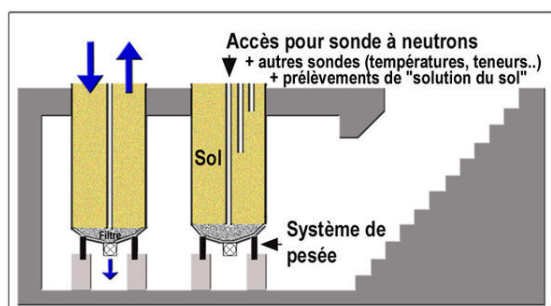
$$\Delta S = P - ET - Q - D$$

Avec :

- ΔS : variation de la quantité d'eau dans le bassin S.
- P : précipitations (pluie)
- ET : évapotranspiration
- Q : eau de ruissellement
- D : eau drainée (en profondeur)



Lysimètre simplifié, Schéma de principe



Lysimètre de précision, ex situ

Schémas de principe d'un lysimètre.

L'évaporation peut donc être calculée à partir de la formule dérivée :

$$ET = P - \Delta S - Q - D$$

Ce type de modélisation semble peu précis sur une courte période mais assez fiable sur une longue période, pour autant que les mesures de pluie sont précises^[30].

Mesures lysimétriques de référence En pratique, les variations d'eau sont mesurées sur une petite parcelle de référence aménagée sous forme de bassin avec un appareil de mesure : le lysimètre. Le lysimètre permet de mesurer (par pesée) la variation d'eau (ΔS) dans le bassin (eau contenue dans le sol et les plantes). Le lysimètre permet également de récupérer et mesurer l'eau drainée (D) vers le sous-sol. L'eau de ruissellement (Q) est récupérée (par exemple avec des rigoles installées en bordure du bassin) pour être mesurée. Les précipitations (P) sont mesurées avec un pluviomètre.

Ces mesures lysimétriques permettent ainsi de déterminer l'évapotranspiration du bassin délimité. Cette évapotranspiration de référence (ET_0) permet ensuite d'estimer ou calculer l'évaporation d'un couvert végétal quelconque, de plus vaste étendue ou d'une autre nature végétale.

Modélisations des pluies et débits Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. Votre aide est la bienvenue !

4.2.2 Bilan atmosphérique



Un tour du réseau FluxNet pour la mesure des covariances de turbulences.

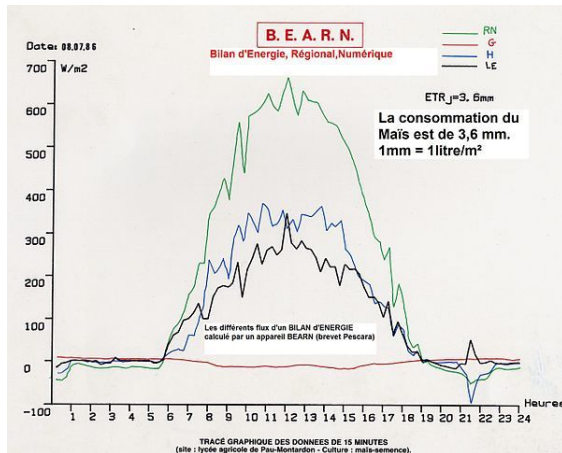


Anémomètre sonique et analyseur infrarouge de gaz pour mesure de covariance des turbulences

Cette méthode consiste à prendre pour référence une tranche d'air atmosphérique au-dessus d'un couvert végétal. L'évapotranspiration est déduite par la mesure et comparaison de l'eau contenue dans cette zone de référence.

La mesure de covariance des turbulences (anglais *eddy covariance*) est une méthode commune d'estimation, avec l'emploi de différents instruments de mesure : anémomètre sonique à trois directions, hygromètre à krypton à champ ouvert^[32]...

4.3 Calcul des flux énergétiques



Flux d'énergie (R_n , H , LE , G) mesurés durant 24h sur un champ de maïs, déterminant un ETR de 3,6 mm.

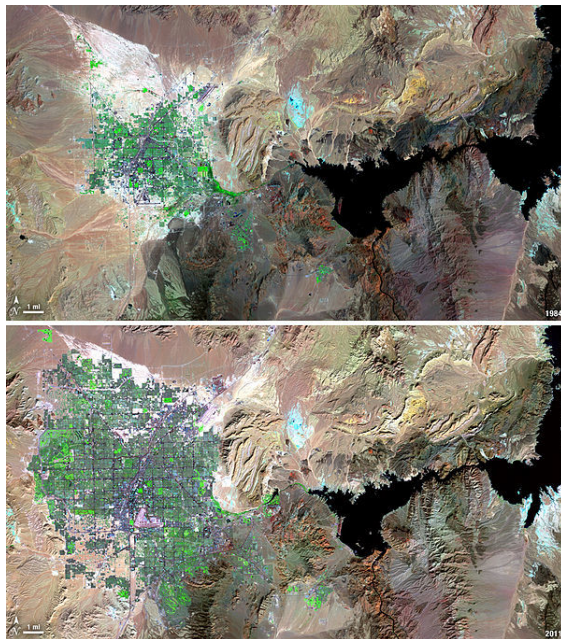


Image du Landsat 5 révélant la végétation (vert) de Las Vegas

Dans une approche physique, la transformation de l'eau en vapeur est considérée selon ses aspects énergétiques. Par cette approche, l'évapotranspiration (ET) correspond au flux de chaleur latente (LE) dans l'équation du bilan d'énergie suivant^[33] :

$$R_n = H + LE_{ET} + G + \Delta CO_2 + \Delta M$$

[réf. nécessaire]

Avec

- R_n : Rayonnement net (bilan du rayonnement solaire, rayonnement réfléchi par surface, rayonnement atmosphérique et de l'émission de surface)
- H : Flux de chaleur sensible (convectif dans l'air)
- G : Flux de chaleur par conduction dans le sol (valeur faible)
- LE : Flux de chaleur latente
- ΔCO_2 : Variation du CO_2 (photosynthèse)
- ΔM : Variation de masse (stockage d'énergie)

En négligeant les variations ΔCO_2 (2-3% de l'énergie) et de ΔM , la formule peut être simplifiée^[33] et l'évapotranspiration est donc estimée d'après les données mesurées et calculées du rayonnement net et des autres flux de chaleur. Sous cette forme, cette approche est également appelée « *Ratio de Bowen* » (méthode d'autant moins fiable que l'environnement est sec^[34]).

$$LE_{ET} = R_n - H - G$$

4.3.1 Mesures sur le terrain

À l'échelle d'un petit couvert végétal, les échanges d'énergie peuvent être mesurés sur le terrain avec différents appareils : Le rayonnement net est mesuré par un pyrromètre. Le flux de chaleur dans le sol est mesuré par un fluxmètre. Les flux de chaleur sensible et latent sont calculés à partir de mesures différentielles de température ambiante et humide de psychromètres placés.

4.3.2 Mesures par satellite

À l'échelle régionale, les échanges d'énergie peuvent être mesurés par certains satellite de télédétection ; leurs radiomètres mesurent les luminances spectrales au sommet de l'atmosphère, pour différentes longueur d'onde (visible, infrarouge, infrarouge thermique...), les albédos et températures de surface, et les indices de végétation. Ces données sont ensuite analysées par différentes méthodes, à l'exemple des algorithmes SEBAL (en) ou S-SEBI^[33].

4.4 Autres méthodes d'estimation


- Estimation de la transpiration végétale par mesure de la circulation de sève^[35].
- Mesure des isotopes stables dans la vapeur d'eau atmosphérique^[36].

5 Bibliographie

5.1 Généralités

- Burman R & Pochop LO (1994) *Evaporation, evapotranspiration and climatic data*. Amsterdam : Elsevier.
- Chamayou, H (1993) *Éléments de Bioclimatologie*, Agence de Coopération Culturelle et Technique, avec la collaboration du Conseil international de la langue française (ISBN 2-85319-237-7), 283 pages [pertinent ?]

5.2 Approches agrométéorologiques

- (en) Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes et Martin Smith, « Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements », *FAO Irrigation and drainage*, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, n° 56, 1998 (lire en ligne) 
- Jacques Kessler, Alain Perrier et Christian de Pescara, *La Météo agricole*, Météole, 1990 (ISBN 2-908215-00-4)

5.3 Approches hydrodynamiques, d'estimation ou modélisation

- Aber JD, & Federer CA (1992) *A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems*. *Oecologia*, 92(4), 463-474 (résumé).
- Abtew W & Obeysekera J (1995) *Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of three estimation methods*, *Transactions of the ASAE*, 38(1), 121-129 (résumé).
- Carlson TN, Capehart WJ & Gillie RR (1995). *A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration*. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 161-167 (résumé).
- Dickinson RE (1984) *Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models*. *Climate processes and climate sensitivity*, 58-72.
- Droogers P & Allen RG (2002) *Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions*. *Irrigation and drainage systems*, 16(1), 33-45.
- Farahani HJ, & Ahuja LR (1996) *Evapotranspiration modeling of partial canopy/residue-covered fields*. *Transactions of the ASAE*, 39(6), 2051-2064.

- Granier A (1977) *Étude bibliographique - Transfert de sève brute dans le tronc des arbres aspects méthodologiques et physiologiques*. In *Annales des Sciences Forestières* (Vol. 34, No. 1, pp. 17-45). EDP Sciences (résumé).
- Hargreaves GH & Samani ZA (1982) *Estimating potential evapotranspiration*. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.
- Hargreaves GH & Allen RG (2003) *History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63 (résumé).
- Katerji N, Perrier A, Renar, D & AISSA A (1983) *Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne : rôle d'un coefficient cultural*. *Agronomie*, 3(6), 513-521.
- Kristensen KJ & Jensen SA (1975) *A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration*. *Nordic Hydrology*, 6(3), 170-188 (résumé)
- Kumar M, Raghuvanshi NS, Singh R, Wallender WW & Pruitt WO (2002). *Estimating evapotranspiration using artificial neural network*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(4), 224-233 ().
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1996). *Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces*. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 495-516.
- Mu, Q, Heinsch FA, Zhao M & Running SW (2007) *Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data*. *Remote Sensing of Environment*, 111(4), 519-536.
- Nemani RR & Running SW (1989) *Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data*. *Journal of Applied meteorology*, 28(4), 276-284.
- Odhiambo, L. O., Yoder, R. E., Yoder, D. C., & Hines, J. W. (2001). Optimization of fuzzy evapotranspiration model through neural training with input-output examples. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1625-1633.
- Perrier A (1975) *Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux*. In *Annales agronomiques*.
- Price JC (1990) *Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration*; *Geoscience and Remote Sensing*, *IEEE Transactions on*, 28(5), 940-948 (résumé).

- Ludovic Oudin, *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global, thèse 2004. en ligne* 
- Running SW, Nemani RR & Hungerford RD (1987) *Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis*. Canadian Journal of Forest Research, 17(6), 472-483.
- Running SW, Nemani RR, Peterson DL, Band IE, Potts DF, Pierce LL & Spanner MA (1989) *Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation*. Ecology, 1090-1101.
- Sharma ML (1985) *Estimating evapotranspiration*. Advances in irrigation, 3, 213-281.
- Stephens JC & Stewart EH (1963) *A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration*. Publication, 62, 123-133.
- Taconet O, Bernard, R & Vidal-Madjar D (1986) *Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data*. Journal of Climate and Applied Meteorology, 25(3), 284-307 (résumé).
- Zimmermann U, Ehhalt D & Münnich KO (1967) *Soil-water movement and evapotranspiration : changes in the isotopic composition of the water*. In Isotopes in hydrology. Proceedings of a symposium (résumé).
- [3] Bosch JM & Hewlett JD (1982) *A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration*. Journal of hydrology, 55(1), 3-23 (PDF, 21 pages).
- [4] Shukla J & Mintz Y (1982) *Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate* Science, 215(4539), 1498-1501 (PDF, 5 pages)
- [5] Morton F (1983) *Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology*. Journal of Hydrology, 66(1), 1-76.
- [6] Thornthwaite CW & Mather JR (1957) *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*.
- [7] Turc, L. (1961) *Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle*. Ann. agron, 12(1), 13-49.
- [8] Taha H (1997) *Urban climates and heat islands : albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat*. Energy and buildings, 25(2), 99-103.
- [9] Bouchet RJ (1963) *Évapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique*. IAHS Publ, 62, 134-142 (PDF, 9 pages)
- [10] Bouchet RJ (1963) *Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle, et production agricole*. Ann. agron, 14(5), 743-824.
- [11] Roche MA (1982) *Évapotranspiration réelle (ETR) de la forêt amazonienne en Guyane*. Orstom Serie Hydrologie, 19, 37-44 (PDF, 8 pages).
- [12] Madec H (1963) *L'évapotranspiration potentielle et le bilan de l'eau en Guyane, d'après les méthodes de Thornthwaite*. Météo nat., Cayenne, 12 p.

5.4 Approches énergétiques

- INRA (1970) *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère* ; INRA Publ. 70-4 Dépôt légal 1970 n° d'ordre 9.046. page 425 Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transfert et des flux dans l'air.
- Gray DM, McKay GA & Wigham JM (1970) *Energy, evaporation, and evapotranspiration*. Principles of hydrology : Port Washington., New York, Water Info. Center Inc, 3-1.
- [13] Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne SI, Sheffield J, Goulden ML, ... & Zhang K (2010) *Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply*. Nature, 467(7318), 951-954.
- [14] Chattopadhyay N, & Hulme M (1997) *Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change*. Agricultural and Forest Meteorology, 87(1), 55-73 (résumé).
- [15] Jensen ME & Haise HR (1963) *Estimating evapotranspiration from solar radiation*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division, 89, 15-41.

6 Notes et références

- [1] Aussenac G & Boulangeat C (1980) *Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (Fagus silvatica L.) et de résineux (Pseudotsuga menziesii (Mirb) Franco)* ; In Annales des Sciences forestières (Vol. 37, No. 2, pp. 91-107). EDP Sciences.
- [2] Zhang L, Dawes WR & Walker GR (2001) *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale*. Water resources research, 37(3), 701-708.
- [16] <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/49/98/16/PDF/memoire.pdf> p. 15
- [17] Allen RG, Prueger JH & Will RW (1992) *Evapotranspiration from isolated stands of hydrophytes : cattail and bulrush* ; Transactions of the ASAE, 35(4), 1191-1198
- [18] Nijskens P (2007) *Étude de l'impact environnemental du TiCR notamment comme filtre biologique dans le cadre du projet européen WILWATER*, PDF, 42 pages)

- [19] Lu, Jianbiao, et al. "A COMPARISON OF SIX POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION METHODS FOR REGIONAL USE IN THE SOUTHEASTERN UNITED STATES1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41.3 (2005) : 621-633. en ligne
- [20] Hamon, W. R. (1960). <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/79479/32827649.pdf?sequence=1> *Estimating potential evapotranspiration*], Thèse de Doctoral, Massachusetts Institute of Technology).
- [21] Oudin2004 p. 22-24 <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/49/98/16/PDF/memoire.pdf>
- [22] Évapotranspiration réelle et potentielle et signification climatique (Cf. *Effet oasis*) - R.J. Bouchet, station centrale de bioclimatologie, Versailles Institut national de la Recherche agronomique (France) [PDF]
- [23] Aussenac G & Granier A (1979) *Étude bioclimatique d'une futaie feuillue (Fagus sylvatica L. et Quercus sessiliflora Salisb.) de l'Est de la France-II. – Étude de l'humidité du sol de l'évapotranspiration réelle*. In *Annales des Sciences Forestières* (Vol. 36, No. 4, pp. 265-280). EDP Sciences.
- [24] Loustau, D., Cochard, H., Sartore, M., & Guédon, M. (1991). **Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (Molinia coerulea (L) Moench)**. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 48, No. 1, pp. 29-45). EDP Sciences
- [25] Aussenac G & Boulangeat C (1980) *Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (Fagus sylvatica L.) et de résineux (Pseudotsuga menziesii (Mirb) Franco)*. In *Annales des Sciences forestières* (Vol. 37, No. 2, pp. 91-107). EDP Sciences.
- [26] Aubreville A (1971) *Quelques réflexions sur les abus auxquels peuvent conduire les formules d'évapotranspiration réelle ou potentielle en matière de sylviculture et de bioclimatologie tropicale*. *Bois et Forêt des Tropiques*, no 136, p. 32-34.
- [27] <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e08.htm#pan> evaporation
- [28] FAO-56 chap. 2
- [29] « *the best results with minimum possible error in relation to a living grass reference crop* », Chapter 2 : FAO-56
- [30] Robin, Ferren, Najjar, « Réseau de mesures simplifiées destiné à l'estimation en continu de l'évapotranspiration et de la pluie », dans *Agriculture intensive et qualité des eaux*, Quae, 1998 en ligne
- [31] FAO-56
- [32] Voir (en) « Using Eddy Covariance to assess terrestrial evapotranspiration »
- [33] Souidi, Hamimed, Merbal, « spatialisation de l'évapotranspiration et des flux énergétiques de surface à partir des données Landsat ETM+ : Application à une région forestière de moyenne montagne en Algérie », 2009 consulter en ligne
- [34] Angus, D. E., & Watts, P. J. (1984). *Evapotranspiration—How good is the Bowen ratio method ?*. *Agricultural Water Management*, 8(1), 133-150 (résumé)
- [35] Voir par exemple « Intérêt des méthodes thermiques de mesure du flux de sève pour l'étude du Man hydrique des savanes », « Utilisation de la mesure thermique du flux de sève pour l'évaluation de la transpiration d'un palmier dattier » 2008
- [36] Williams, D. G., et al. "Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques." *Agricultural and Forest Meteorology* 125.3 (2004) : 241-258. consulter online

7 Annexes

7.1 Articles connexes

- Climat
- transpiration
- Microclimat
- bioclimatologie
- Îlot de chaleur urbain

7.2 Liens externes

- Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. Votre aide est la bienvenue !

-  Portail de l'eau

-  Portail de la botanique

-  Portail de la météorologie

-  Portail de l'agriculture et l'agronomie

8 Sources, contributeurs et licences du texte et de l'image

8.1 Texte

- **Évapotranspiration** *Source* : <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vapotranspiration?oldid=114185315> *Contributeurs* : Cdang, Abrahami, Robbot, Spedona, Spooky, Phe-bot, Criric, Bob08, RobotE, Zetud, Romanc19s, David Berardan, Arnaud.Serander, Gzen92, Léna, Coyau, RobotQuistnix, Loveless, Oxo, Emericpro, Pierre cb, Lamiot, GilliamJF, Thijs !bot, JAnDbot, Eiffele, VonTasha, Analphabot, Ironie, Wikig, Salebot, Zorrobot, SalomonCeb, Tooony, VolkovBot, CPPC, BotMultichill, SieBot, JLM, DumZiBoT, DragonBot, WikiCleanerBot, ZetudBot, Ggal, Luckas-bot, Micbot, Zorlot, Cantons-de-l'Est, Lomita, EmausBot, Rehtse, Ediacara, Les3corbiers, Jules78120, Eros16eden, LinedBot, Rigoureux, LoulOu&les brocolis, Williamson Thomas, Leuviah, Dimdle, Addbot, Gratus, Sacha11999, N'Demenye, Anpanman et Anonyme : 32

8.2 Images

- **Fichier:Eddy_Covariance_IRGA_Sonic.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Eddy_Covariance_IRGA_Sonic.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : Own work by the original uploader *Artiste d'origine* : Veedar sur Wikipedia anglais
- **Fichier:Energy_Balance.JPG** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/Energy_Balance.JPG *Licence* : CC BY-SA 2.5 *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Evaporation_Pan.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Evaporation_Pan.jpg *Licence* : CC BY 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Bidgee
- **Fichier:Grass_dsc08672-nevit.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/68/Grass_dsc08672-nevit.jpg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Nevit Dilmen
- **Fichier:Holdridge_FR.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/Holdridge_FR.png *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Lucquessoy
- **Fichier:Humidity_sensor.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Humidity_sensor.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : [http://sofia.usgs.gov/projects/evapotrans/photos/temperature-humidity_sensor_on_exchange_arm\(2\).jpg](http://sofia.usgs.gov/projects/evapotrans/photos/temperature-humidity_sensor_on_exchange_arm(2).jpg) *Artiste d'origine* : USGS
- **Fichier:Icône_botanique01.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8b/Icône_botanique01.png *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Transferred from fr.wikipedia ; transfer was stated to be made by User:Jacopo Werther. *Artiste d'origine* : Original uploader was Pixeltoo at fr.wikipedia
- **Fichier:Icono_Gota_de_Agua.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Icono_Gota_de_Agua.svg *Licence* : GFDL *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Rastrojo (D•ES)
- **Fichier:Landsat_View_Las_Vegas_Nevada_-_Flickr_-_NASA_Goddard_Photo_and_Video.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Landsat_View%2C_Las_Vegas%2C_Nevada_-_Flickr_-_NASA_Goddard_Photo_and_Video.jpg *Licence* : CC BY 2.0 *Contributeurs* : Landsat View : Las Vegas, Nevada *Artiste d'origine* : NASA Goddard Space Flight Center from Greenbelt, MD, USA
- **Fichier:Leaf_function.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Leaf_function.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : Vlastní dílo (own work), partially derived from file:Lilac.leaves.arp.jpg *Artiste d'origine* : Vojtech.dostal
- **Fichier:Lysimètre.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Lysim%3%A8tre.jpg> *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : F Lamiot *Artiste d'origine* : User Lamiot on fr.wikipedia
- **Fichier:Medicago_falcata_bgiu.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Medicago_falcata_bgiu.jpg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Nuvola_apps_ksig_horizonta.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Nuvola_apps_ksig_horizonta.png *Licence* : LGPL *Contributeurs* : <http://www.icon-king.com> *Artiste d'origine* : David Vignoni
- **Fichier:Sahara.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/Sahara.jpg> *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Florence Devouard *Artiste d'origine* : Florence Devouard (User:Anthere)
- **Fichier:Surface_water_cycle.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Surface_water_cycle.svg *Licence* : CC BY 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Mwtoews
- **Fichier:Tomato_leaf_stomate_cropped_and_scaled.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/85/Tomato_leaf_stomate_cropped_and_scaled.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : based on File:Tomato leaf stomate 1-color.jpg, which is actually based on <http://remf.dartmouth.edu/images/botanical/LeafSEM/source/16.html> *Artiste d'origine* : derived by me
- **Fichier:Tonzi_Tower.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Tonzi_Tower.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/Images/tonzi_tower_July.jpg *Artiste d'origine* : Oak Ridge National Laboratory
- **Fichier:Tractor_icon.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Tractor_icon.svg *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Spedona
- **Fichier:Weather-more-clouds.svg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Weather-more-clouds.svg> *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* :
 - Weather-clear.svg *Artiste d'origine* : Weather-clear.svg : Linuxerist, Millosh

8.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0