

Le climat et la production végétale

À partir d'une contribution de F. Maraux (CIRAD)

Les plantes se présentent comme des objets vivants, capables de fournir à l'humanité (directement ou indirectement) son alimentation, et d'occuper l'espace minéral dans lequel elles évoluent. Si on les observe avec l'œil du biologiste ou du physicien, elles se présentent aussi comme des machines biologiques, dont la propriété principale est de convertir l'énergie solaire en biomasse. Le mécanisme mis en jeu est la photosynthèse, qui dote les plantes d'un système permettant d'intercepter l'énergie lumineuse, d'investir cette énergie dans la réorganisation du CO_2 de l'air en molécules organiques simples, de les reconfigurer en molécules plus élaborées (assimilats), puis de redistribuer ceux-ci dans les différents organes de la plante (végétatifs, reproductifs et de stockage).

L'efficacité de la machine biologique est, au premier abord, faible (de l'ordre de 4 %) ; c'est-à-dire que, si la plante est au mieux de sa forme, seulement 4 % de l'énergie radiative qu'elle intercepte sont effectivement convertis sous forme de biomasse au terme du processus. Les 96 % restants sont dissipés sous forme de rayonnement (réfléchi ou ré-émis dans l'atmosphère), ou de chaleur dissipée dans l'atmosphère ou dans le sol, sous forme sensible (élévation de température) ou latente (évapotranspiration). Cependant, compte tenu de la taille de la surface terrestre qui reçoit le rayonnement solaire, les quantités d'énergie et de biomasse sont très importantes : à titre d'exemple, dans les débats actuels sur les accords de Kyoto dans le cadre de la convention cadre sur les changements climatiques, les seuls Etats-Unis estiment que leurs forêts permettent de piéger annuellement 300 millions de tonnes de CO_2 .

L'efficacité de la conversion d'énergie radiative en biomasse est encore atténuée par de nombreux facteurs, liés pour une part aux caractéristiques génétiques des plantes considérées (nous n'en parlerons pas), et d'autre part aux facteurs du milieu (nous les détaillerons) qui font que la machine biologique fonctionne plus ou moins bien.

LES BASES PHYSIQUES DE L'AGROCLIMATOLOGIE

● *Le bilan radiatif*

Le soleil émet dans l'espace un rayonnement continu (rayonnement extraterrestre), dont la longueur d'onde est comprise entre 0,3 et 2,8 micromètres, et à l'intérieur de laquelle les longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,78 micromètres correspondent à la bande visible. Ce rayonnement attaque la terre sous un angle dépendant de la période de l'année et de la latitude du lieu. À la verticale, et s'il ne subissait aucune

atténuation en traversant l'atmosphère, il apporterait une énergie de 8,4 joules par centimètre carré et par minute. Une partie de ce rayonnement est interceptée par l'atmosphère et la couche nuageuse, et une partie du rayonnement transmis est réfléchi par la surface de la terre et repart vers l'univers. Cette fraction du rayonnement est appelé l'albédo, et dépend principalement des caractéristiques de la surface d'interception (sa couleur, sa géométrie). Si c'est de la neige fraîche, l'albédo est de l'ordre de 0,8 (presque toute l'énergie reçue est réfléchi, ce qui explique la persistance des manteaux neigeux) ; si c'est de l'eau, l'albédo est proche de 0 (presque toute l'énergie reçue est absorbée) ; si c'est un couvert végétal, il peut varier entre 0,15 et 0,3.

Dans l'infrarouge, la terre reçoit aussi un rayonnement, dont la longueur d'onde est comprise entre 0,78 et 50 micromètres, émis par l'atmosphère, la couche nuageuse, et dans une moindre mesure le soleil ; mais la terre ré-émet également un rayonnement vers l'univers dans ces mêmes longueurs d'onde. Réception et émission de ce rayonnement dans l'infrarouge peuvent représenter une part importante du bilan radiatif (20 à 50 %), et sont très à l'ordre du jour depuis quelques années, car ils gouvernent le phénomène d'effet de serre. On explique ainsi sommairement ce phénomène : l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement infrarouge émis par la terre, et certains gaz émis par suite des activités humaines (le CO_2 , le CH_4 , le N_2O) favorisent fortement cette absorption. Ce faisant, tout se passe comme si, à l'image d'une serre, ce rayonnement était retenu par l'atmosphère, et donc contribuait à son réchauffement. L'augmentation de la teneur de l'atmosphère en ces différents gaz ne modifie pas la composante radiative issue du soleil, mais augmente la rétention de chaleur par l'atmosphère dans l'infrarouge.

Bilan radiatif à la surface de la terre

L'équation qui suit exprime le bilan radiatif à la surface de la Terre : $R_n = (1 - \alpha) R_s + R_{nl}$

R_n est le solde du bilan radiatif, ou rayonnement net, et représente l'énergie nette reçue par la Terre toutes longueurs d'ondes confondues, exprimé en mégajoules par mètre carré et par jour ; α est l'albédo (sans dimension, entre 0 et 1) ; R_s est le rayonnement incident (après avoir traversé l'atmosphère et la couche nuageuse) ; R_{nl} est le bilan dans les grandes longueurs d'ondes (rayonnement émis par la voûte céleste moins celui qui est ré-émis par la terre), exprimé aussi en mégajoules par mètre carré et par jour.

● **Le bilan d'énergie**

Nous analysons maintenant l'utilisation qui est faite de cette énergie.

● **Le cas d'une nappe d'eau libre**

L'étude d'une nappe d'eau libre intéresse en principe assez peu les agronomes ; elle permet cependant d'étudier dans un cadre physique simple les échanges d'eau et d'énergie entre la terre et l'atmosphère.

L'énergie radiative reçue par une surface d'eau libre, solde du bilan radiatif, a trois destins possibles :

- > réchauffer l'eau libre ;
- > réchauffer l'atmosphère au-dessus de la nappe d'eau ;
- > faire passer de l'eau de la forme liquide à la forme vapeur (évaporation : on rappelle que pour passer de la forme liquide à la forme vapeur, l'eau a besoin d'énergie, en moyenne 2500 joules pour vaporiser un gramme d'eau).

L'équation suivante exprime ce bilan : $R_n = H + G + \lambda ET$

H est le flux de chaleur dans l'air (dont l'intégrale est le réchauffement ou le refroidissement de l'atmosphère), G le flux de chaleur dans la nappe d'eau, et λET la chaleur latente de vaporisation (correspondant au flux d'évaporation).

Cette équation illustre l'effet de vases communicants entre les différents destins de l'énergie radiative reçue. Si l'on simplifie encore cette équation, en disant qu'à l'échelle de la journée, le terme G s'annule (le réchauffement de l'eau pendant la journée est annulé par le refroidissement qui s'opère pendant la nuit), on a $R_n = H + \lambda ET$.

Dans ce cas, c'est la formule de Penman qui dicte les termes de la partition qui s'opère entre chaleur (H) et évaporation (λET). Vitesse du vent et humidité relative de l'air entrent dans la formule, car ils conditionnent l'efficacité avec laquelle l'énergie radiative peut être convertie en vaporisation de l'eau.

Formule de Penman

$$\lambda ET = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

R_n est le rayonnement net, Δ la pente de la courbe de pression saturante de vapeur d'eau en fonction de la température de l'air, γ la constante psychrométrique et E_a le pouvoir évaporant de l'air, fonction de la vitesse du vent et de l'humidité

● Le cas de l'eau dans le sol

Lorsque l'énergie est reçue par un sol nu, le phénomène est tout à fait similaire, à cette différence près que le sol est plus ou moins humide. S'il est parfaitement humide, il se comportera comme une nappe d'eau libre ($R_{n_0} = H_0 + \lambda ET_0$). S'il est parfaitement sec, aucune quantité d'eau ne pourra être vaporisée (toute l'énergie reçue sera alors utilisée pour réchauffer sol et atmosphère : $H = R_{n_0}$). S'il est plus ou moins humide, on sera dans une situation intermédiaire (avec $H > H_0$, et $\lambda ET < \lambda ET_0$).

● Le cas des couverts végétaux

Les plantes, par leurs systèmes racinaires, puisent de l'eau dans le sol, la transportent vers les feuilles et l'eau est mise au contact de l'atmosphère dans des micro organes appelés stomates. C'est à ce niveau que se fait la vaporisation de l'eau. Par la possibilité qu'elles ont d'ouvrir ou de fermer leurs stomates, les plantes régulent leur transpiration ; si les stomates sont grand ouverts, en première approximation, on considérera que la plante transpirera comme une nappe d'eau libre ; s'ils sont fermés, elle ne transpirera pas.

● L'évapotranspiration potentielle

On l'a vu, les échanges d'eau entre le sol, les plantes et l'atmosphère sont gouvernés principalement par des considérations énergétiques. *Il est donc incorrect de parler de besoin en eau des plantes indépendamment des conditions environnementales dans lesquelles elles sont cultivées.*

Par ailleurs, pour une énergie radiative reçue, l'état de surface de la terre (sol et végétaux), le niveau de disponibilité de l'eau en surface, et le comportement stomatique des plantes vont gouverner la partition de l'énergie entre chaleur et évaporation.

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle

La formule de Penman-Monteith, standardisée par la FAO en 1998, déduite de celle initialement élaborée par Penman (en 1948) pour calculer l'évaporation d'une nappe d'eau libre, permet d'étendre à des couverts végétaux ne souffrant d'aucune limitation quant à la disponibilité de l'eau dans le sol, le calcul de la somme de l'évaporation (eau du sol) et de la transpiration (transitant par les plantes) d'un couvert. C'est l'évapotranspiration potentielle (ET_0 , anciennement appelée ETP). Elle se réfère à un gazon, et prend en compte à la fois les phénomènes énergétiques décrits plus haut pour une nappe d'eau libre et les comportements spécifiques des couverts végétaux.

● Variations de l' ET_0 en fonction des paramètres climatiques

Quatre paramètres fondamentaux rentrent à des niveaux divers dans la formule :

- > le rayonnement ;
- > la vitesse du vent ;
- > l'humidité de l'air ;
- > la température de l'air.

Ce sont les quatre paramètres à partir desquels on peut calculer la demande climatique en un lieu, ses variations au cours du temps, sa variabilité d'une année à l'autre.

● L'évapotranspiration et la production de biomasse

L'alimentation hydrique des cultures est le premier facteur conditionnant son rendement. Si une espèce cultivée pour ses grains ou ses tubercules ne peut satisfaire que la moitié de ses besoins, on considère généralement qu'elle ne pourra pas fournir de rendement, et elle ne pourra être utilisée que comme parcours, ou espace sylvo-pastoral. C'est pourquoi une caractérisation agroclimatique d'une région s'intéresse en tout premier lieu à l' ET_0 .

En confrontant l' ET_0 à la pluviométrie, on a d'emblée un indicateur extrêmement pertinent. Bien que la production de biomasse soit *a priori* directement issue du rayonnement (1 mégajoule intercepté permet, à l'optimum, la production de 1,7 à 2,7 grammes de biomasse sèche, selon l'efficacité des plantes), l'alimentation hydrique conditionne pour une bonne part l'efficacité avec laquelle la photosynthèse pourra se réaliser. On peut estimer très grossièrement, pour les cultures annuelles, une liaison entre eau évapotranspirée en conditions de culture et biomasse produite par la relation suivante : 500 litres d'eau par mètre carré permettent la production d'un kilo de biomasse sèche.

LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES ET LES ACTIVITÉS AGRICOLES

● Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau peut être résumé ainsi : l'eau s'évapore depuis les surfaces d'eau libre, depuis le sol, les glaciers, et les végétaux. L'eau atmosphérique se condense dans les nuages, puis précipite à la surface de la terre. Elle est interceptée par la surface, à partir de laquelle elle s'infiltré (elle peut alors soit être stockée dans les horizons de surface, soit rejoindre les couches géologiques profondes), ou elle ruisselle (pour s'infiltrer plus loin ou rejoindre ruisseaux, cours d'eau, lacs ou océans). Ce cycle est fermé (il n'y a pas néoformation d'eau sur la terre ni transferts d'eau vers l'espace), mais, à la faveur des actions de l'homme ou des phénomènes naturels, les différents compartiments du cycle de l'eau peuvent être modifiés.

Tableau 1. Eau contenue dans les différents compartiments (en pourcentage de l'eau totale)

Océans	97,4 %
Atmosphère	0.009 %
Glaciers	1,96 %
Nappes souterraines	0,6 %
Lacs	0,015 %
Eau du sol	0,005 %
Rivières	0,0002 %

Les eaux qui intéressent la production agricole représentent une très faible part des eaux de la planète ; elles sont pourtant déterminantes dans la régulation du climat et de ses effets induits.

● Le climat

On définit le climat comme «*la série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu, dans leur succession habituelle* ». Les phénomènes qui gouvernent les processus conduisant à l'établissement du climat. On pourrait faire de même pour l'ensemble des paramètres qui caractérisent le climat. Tous ces paramètres sont liés les uns aux autres et les lois de la physique permettent d'établir des modèles de circulation générale de l'atmosphère permettant la prédiction du temps. On se contentera de dire que ces lois ont un caractère à la fois déterministe (on peut prédire à cinq ou six jours de manière fiable l'évolution des paramètres dans un lieu donné) et probabiliste (au-delà de ce délai, on peut en donner des distributions de probabilités).

● Le climat change-t-il ?

On a depuis quelques années toutes les raisons de penser que le climat change, notamment sous l'action de l'homme : émissions de gaz à effet de serre, dont le CO₂. De nombreux scénarios sont envisagés, conduisant à une hypothèse de réchauffement

global¹, ce même réchauffement conduisant à des modifications de la végétation, de la productivité, de la distribution des autres paramètres du climat. De nombreux travaux de recherche, associant climatologues et agronomes, visent à prévoir les effets de ces changements et leurs impacts sur l'agriculture.

● **Les paramètres climatiques**

● **La pluviométrie**

La pluviométrie est le paramètre climatique le plus étudié, car c'est le plus variable d'une année à l'autre et d'un lieu à l'autre. Température, rayonnement, humidité relative de l'air et vitesse du vent présentent des coefficients de variation (CV²) mensuels interannuels faibles (de l'ordre de 5 % pour le Sahel), alors que la pluviométrie présente des cv mensuels de 30 %, et des extrêmes oscillant de plus de 100 % autour de la moyenne. Par ailleurs, plus on réduit les pas de temps sur lesquels on analyse les données, plus les cv augmentent, et par voie de conséquence, plus il faut de longues séries historiques pour que les valeurs moyennes aient un sens. Pour autant, il est essentiel pour étudier les risques agricoles de caractériser, en même temps que la moyenne, la dispersion des valeurs. On dispose pour cela de différents outils.

● **L'analyse fréquentielle**

Elle repose sur l'hypothèse que les valeurs et la variabilité de la pluviométrie enregistrée dans les séries historiques passées est représentative des valeurs et de la variabilité de la pluviométrie que l'on pourra avoir dans l'avenir. Comme on l'a vu, cette hypothèse est forte. La technique consiste à traiter statistiquement une série de données de pluviométrie, à la classer par ordre croissant, à la segmenter, à calculer les fréquences d'apparition de montants pluviométriques³, et à en déduire les probabilités qu'un certain niveau de pluie soit atteint.

● **Les générateurs de climat**

On procède de la même manière que précédemment, mais on ajuste sur les séries observées des lois de distribution de probabilités, caractérisées par des paramètres : moyenne, écart-type... À la différence de la technique précédente, l'utilisation de générateurs de climat autorise la modification des paramètres des lois, donc permet d'introduire des hypothèses sur le changement de climat : tendance à l'augmentation ou à la diminution, augmentation des risques d'évènements extrêmes, etc.

● **La prévision saisonnière**

Des travaux récents menés à partir de l'étude du phénomène *El Niño* ont permis d'établir des prévisions portant sur quelques mois, et de donner en terme de probabilités la tendance attendue une saison donnée par rapport à une tendance moyenne générale attendue. Ces prévisions sont basées sur des mesures d'évolution de la température des océans, qui rentrent dans une part importante du bilan énergétique local. Bien qu'on ne connaisse pas très bien encore le degré de fiabilité de ces prévisions, il

1 Les simulations conduisent à des scénarios dans lesquels la température augmente entre 1 et 6 degrés durant ce siècle.

2 CV : rapport de l'écart type sur la moyenne.

3 Une année sur dix, sur cinq, sur deux, etc.

est probable que, dans les années qui viennent, les méthodes s'affineront et permettront de formuler en début de saison des conseils précieux pour les agriculteurs : dates de semis, espèces ou variétés à semer, compte tenu des précipitations attendues.

● Le rayonnement

La partie visible du rayonnement solaire et à l'intérieur de celle-ci la partie dite « photosynthétiquement active »⁴, représente le carburant de la machine à produire de la biomasse. Au premier ordre, ses variations dépendent de la latitude et de la période de l'année⁵, et de la couverture nuageuse. Ainsi, ce n'est pas forcément dans les régions intertropicales, bien que les rayons du soleil y attaquent la terre quasi verticalement, que l'on aura les plus forts rayonnements : la durée du jour y est de l'ordre de 12 heures⁶. Par ailleurs, du fait des conditions de nébulosité, les différences peuvent être importantes entre régions tropicales : en Côte d'Ivoire, 44 % seulement du rayonnement global incident arrive au sol, alors que ce rapport atteint 60 % dans les régions sahéliennes.

● Le vent et l'humidité relative de l'air

Comme les autres paramètres climatiques, la vitesse du vent résulte du bilan énergétique qui provoque des différences de pression entre des masses d'air. En ce qui concerne la production agricole, le vent intervient à deux niveaux principaux : d'abord par son effet sur l'évapotranspiration des cultures, et, ensuite, par son effet mécanique sur les cultures.

● L'évapotranspiration

On l'a vu dans la formule de Penman, le vent intervient dans le second terme de la formule, combiné à l'humidité relative de l'air. En moyenne, à la surface du globe, il pèse de l'ordre du quart de l' ET_0 mais, localement, il peut peser autant que le terme radiatif : vents forts et secs, comme le mistral en vallée du Rhône, ou l'harmattan en région sahélienne. À l'inverse, dans les régions équatoriales, son effet sera souvent négligeable : vents généralement faibles et fortement humides.

● Les effets mécaniques sur les cultures

Même sans prendre en compte les événements exceptionnels (ouragans), contre lesquels on ne peut se défendre, le vent peut faire verser, voire briser les cultures sur pied ; il peut aussi générer des nuages de poussière. Lorsque c'est nécessaire, il est possible de lutter contre ces effets en établissant des brise-vents. Ces derniers ont pour effet de perturber les écoulements des masses d'air, en créant à la surface de la terre des obstacles physiques (rugosité) qui concourent à l'effet recherché. Ces brise-vents peuvent être constitués de barrières artificielles ou de rideaux d'arbres. Dans ce dernier cas, pour bien analyser leur impact, il faut tenir compte des effets d'ombrage et des prélèvements d'eau effectués par les arbres.

4 PAR, de l'ordre de 50 % du rayonnement solaire.

5 Qui jouent à deux niveaux : incidence des rayons du soleil et durée du jour.

6 Contre 16 à 18 heures dans les régions tempérées en été.

● La température

La température résulte de l'état initial de la masse d'air et du bilan d'énergie local (cf. chapitre 414). En ce sens, elle joue en retour dans la détermination des besoins en eau, on n'y reviendra pas. Mais la température de l'air a aussi des effets déterminants sur la croissance et le développement des plantes. En dessous d'une certaine température, les plantes ne poussent pas ; au-dessus d'une certaine température, propre à chaque espèce, la croissance est pénalisée, voire arrêtée. Entre ces deux valeurs, la température pilote l'efficacité avec laquelle la machine biologique convertit le rayonnement en biomasse (croissance).

Le développement des plantes passe par des étapes, que la plante parcourt conformément à une programmation génétique interne. Pour les céréales, les grandes étapes sont : germination, phase végétative, phase reproductive, remplissage des grains. Chacune de ces étapes peut à son tour être subdivisée.

Points et degrés jours

Tout se passe comme si les plantes avaient besoin de cumuler un certain nombre de points, au terme desquels elles passeraient à l'étape suivante. Les points sont des degrés jours, que l'on calcule de la manière suivante :

- on détermine la base (température du zéro de végétation) : T_0 ;
- on somme, sur un pas de temps journalier, l'écart entre température moyenne de l'air T_m et celle de la base T_0 . On obtient $S = \sum (T_m - T_0)$

La plante passe au stade phénologique suivant lorsqu'elle a atteint la valeur S requise.

Ces principes restent généraux, et ne prennent pas en compte les besoins physiologiques propres à chaque espèce : sensibilité aux températures extrêmes, sensibilité accrue à un moment précis du cycle, température du sol, etc. C'est pourquoi on mesure autant que faire se peut les températures minimales et maximales, et on traite ces valeurs avec des outils statistiques permettant d'estimer des risques particuliers.

Connaissant les espèces et les variétés ainsi que leurs besoins, on peut, à partir de données climatiques, cartographier les caractéristiques thermiques d'une région et les appairer pour en déduire les aptitudes d'une région à une culture donnée.

Attention : pour une étude opérationnelle, l'analyse proposée ne peut en aucun cas être menée en ignorant les autres contraintes potentielles, et notamment la contrainte hydrique.

LA MESURE DES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

● **L'évolution de la technologie**

On dispose d'enregistrements météorologiques systématiques depuis le XIX^e siècle, mais c'est réellement depuis la fin de la seconde guerre mondiale que le système de mesure, les normes, l'enregistrement, le contrôle de qualité des données ont été systématisés. L'Organisation mondiale de météorologie (OMM) joue un rôle central dans ce processus de systématisation. Pour chaque paramètre, on dispose de normes, d'appareils agréés etc. qui ont fiabilisé l'ensemble du système.

Classiquement, les appareils météorologiques se divisaient en deux catégories : les appareils à lecture instantanée et les appareils dotés d'un mécanisme d'horlogerie, permettant d'enregistrer sur un graphique l'évolution du paramètre au cours de la journée : par exemple le thermomètre/thermographe ou le pluviomètre/pluviographe. Dans la pratique, les appareils à lecture directe sont en cours de disparition, et les appareils enregistreurs sont maintenant souvent des appareils qui émettent un signal électronique variable en fonction de la valeur du paramètre mesuré, ce qui permet de les connecter à des centrales d'acquisition de données sur place ou à distance : transmission par câble, par radio ou par satellite.

Cela permet des opérations de stockage, contrôle et interprétation immédiats et fiabilisés. Par ailleurs, de nombreux satellites météorologiques disposent de capteurs permettant d'appréhender, soit directement soit indirectement, les paramètres climatiques au sol. À la différence d'époques passées, on n'est plus démuné de données météorologiques, même dans les contrées les plus inaccessibles de la planète.

Nous décrivons sommairement, pour chaque paramètre climatique important, le principe de la mesure, des appareils, et des enregistrements.

● **La pluviométrie**

C'est *a priori* la mesure la plus simple et la moins coûteuse. On peut utiliser un pluviomètre aux normes recommandées par l'OMM, mais on ne fait pas une grosse erreur de mesure en recueillant les eaux de pluie dans un récipient cylindrique, placé horizontalement si l'on respecte quelques précautions de bons sens. On a aussi accès à des estimations indirectes, basées sur des mesures de température de nuages froids accessibles par les satellites météorologiques. L'intérêt de cette méthode, en dépit de son imprécision, est la possibilité de couvrir de vastes étendues, sur lesquelles des conditions de transport ou de suivi des stations météorologiques ne permettent pas de recueillir des informations fiables.

● **Le rayonnement**

On mesurait classiquement le rayonnement instantané avec des actinomètres ou des pyranomètres, dont le principe est l'absorption du rayonnement par un corps noir qui convertit en chaleur ce rayonnement reçu. Mais on dispose maintenant de capteurs capables de découper le rayonnement en bandes spectrales, et de mesurer le rayonnement spécifique reçu dans chacune de ces bandes (radiomètres).

L'héliographe

Plus simplement, des mesures encore très répandues sont réalisées à partir de l'héliographe, constitué d'une boule de verre qui concentre le rayonnement direct du soleil, lorsque celui-ci n'est pas masqué par les nuages, et brûle une bande de papier gradué.

Le dépouillement de ces bandes de papier donne une durée d'ensoleillement (n) que l'on convertit en rayonnement par une relation statistique de bonne qualité à l'échelle décadaire ou mensuelle : $R_s = R_a (a_s + b_s n/N)$

R_s est le rayonnement incident, R_a le rayonnement extraterrestre ; a_s et b_s sont des coefficients empiriques, dépendant du lieu, mais pour lesquels on ne fait pas une grosse erreur lorsque l'on retient : $a_s = 0,25$ et $b_s = 0,50$

Enfin, les satellites météorologiques fournissent, avec une résolution de 5 km, des données journalières de rayonnement, accessibles au public.

On prêtera une attention particulière aux unités dans lesquelles sont exprimés les rayonnements mesurés, en s'efforçant de ne retenir que les watts par mètre carré pour les puissances, et les joules par mètre carré et par jour pour les énergies. La littérature regorge d'unités spécifiques, liées aux instruments eux-mêmes, et qu'on ne peut pas toujours convertir directement en unités du système international.

● *Le vent*

La vitesse du vent est classiquement mesurée par des anémomètres (ou graphes), qui enregistrent et totalisent des distances parcourues, ainsi que la direction du vent. À la différence des autres paramètres météorologiques, les appareils de mesure du vent ont connu peu d'évolutions technologiques au cours des dernières années, et on dispose par techniques satellitaires seulement de méthodes indirectes peu fiables.

● *L'humidité relative de l'air*

Elle est mesurée classiquement par des hygrographes, et plus récemment par des capteurs électroniques, reliés à des centrales d'acquisitions de données. Ces capteurs sont de plus en plus fiables. Ils doivent être cependant régulièrement étalonnés, à l'aide de psychromètres qui restent les appareils les plus exacts et fiables pour la mesure ponctuelle de l'humidité.

● *La température*

Les températures mini/maxi/moyennes, de l'air et du sol, sont classiquement mesurées par des thermomètres, placés dans des abris aux plans standardisés. Cependant, on a de recours à des thermocouples⁷ ou à des thermistances, reliés à une centrale d'acquisition de données. Des mesures indirectes par satellite sont aussi possibles, assez généralisées et fiables.

⁷ Soudure entre deux métaux, qui émet une différence de potentiel proportionnelle à la température.

● Estimation de l'évapotranspiration

Par le passé, on disposait de nombreux appareils dont la fonction directe ou indirecte était l'estimation de l'ETP. Les plus classiques sont :

- > *le bac classe A*. Ce bac cylindrique, aux dimensions standardisées, contient de l'eau qui s'évapore pendant la journée. On mesure chaque jour à l'aide d'une vis micrométrique la hauteur d'eau évaporée ; en cas de pluie, on déduit du montant mesuré la hauteur de pluie mesurée dans le pluviomètre ;
- > *le Piche* : du nom de son inventeur, il est constitué d'un tube gradué, contenant de l'eau, fermé à une extrémité, bouché à l'autre extrémité par une pastille de papier buvard en contact avec l'eau du tube. Le tube est placé dans un abri météorologique. On mesure chaque jour la hauteur d'eau qui a disparu. La valeur de l'évaporation Piche est très corrélée au déficit de saturation de l'air et au vent, mais a peu à voir avec l'évapotranspiration ;
- > *les lysimètres (à drainage ou pesables)* : conçus comme des ensembles étanches, les lysimètres ont pour principe la mesure du bilan hydrique d'une surface évaporante. S'ils sont pesables, on mesure les différences entre deux dates de masse de l'ensemble sol plus eau plus végétation. S'ils sont à drainage, on récupère un excès d'eau, dont la différence par rapport à la quantité d'eau que l'on a apportée représente la quantité d'eau évapotranspirée pendant la période.

Ces dispositifs, très utilisés par le passé, ne le sont plus guère. L'expérience a montré en effet que, soit pour des raisons théoriques⁸ ou de conduite pratique⁹, *il y a de gros avantages à calculer l' ET_0 à partir de la formule de base plutôt qu'à partir de mesures supposées directes*. La même remarque s'applique pour les formules plus ou moins empiriques que l'on trouve en quantité dans la littérature scientifique¹⁰.

● Les stations météorologiques automatiques

Les stations météorologiques classiques sont de plus en plus abandonnées : elles se révèlent coûteuses d'entretien et leur fiabilité est à la mesure de celle à la fois des observateurs et des appareils. De plus en plus, y compris dans les pays disposant de peu de moyens, on leur préfère les stations automatiques. Celles-ci ont des niveaux de sophistication divers : alimentation électrique classique ou par panneaux solaires, données stockées sur support informatique ou télé transmises, etc. Pour un coût initial de l'ordre de 6000 euros, elles permettent de fournir des données fiables, prétraitées, qui, globalement, permettent d'augmenter sensiblement le rapport qualité/coût des données.

8 Géométrie des appareils, perturbations liées à l'environnement.

9 Les oiseaux viennent s'abreuver dans les bacs, les observateurs se trompent dans les relevés.

10 Thornthwaite, Hargreaves, Turc, Blaney et Criddle, etc.

● Représentativité des données

En principe, chaque station météo n'est représentative que de l'endroit où les données ont été mesurées. Pour estimer la représentativité spatiale, il n'y a pas à proprement parler de méthode. On peut néanmoins, pour résoudre le problème, chercher à répondre à deux questions :

- > « *quels sont les facteurs qui font que les données que je mesure en un point A ne seraient pas représentatives de ce qui se passe en un point B ?* » Les réponses à cette question tiennent souvent au relief et aux gradients naturels ;
- > « *sur quelle base extrapoler, ou interpoler des données que j'observe en un point A et en un point B, pour estimer les paramètres en un point C sur lequel je n'ai pas de données ?* »

La réponse à la question 1 donne les clés de la réponse à la question 2. On notera par ailleurs que la variabilité spatiale des pluies est très sensiblement plus élevée que celle de la température, du rayonnement ou de l'humidité de l'air.

En cas d'absence de données

Pour les données manquantes, la FAO (FAO 56, p. 58) propose des formules climatiques ou statistiques permettant d'approcher indirectement des données manquantes. La FAO a fait un gros effort de rassemblement des données météorologiques complètes, sur des pas de temps mensuels, accessibles sur demande dans la base de données CLIMWAT¹¹. De plus, la base de données FAOCLIM (sur cédérom) fournit les principales données de quelque 19 000 stations de par le monde.

Par ailleurs, un certain nombre de serveurs distribuent des données météorologiques en libre service¹² pour tous les endroits du monde définis par la latitude et la longitude. Sauf exception, on n'a pas accès aux données brutes d'un lieu et un jour donné, mais à des moyennes qui, dans l'immense majorité des cas, sont suffisantes pour les applications que l'on veut en tirer en agriculture.

LES CLIMATS DE LA ZONE INTERTROPICALE

Les climats de la zone intertropicale sont *toujours chauds en plaine*. Il n'y a pas de saisons thermiques et c'est la pluviométrie qui permet de définir éventuellement une saisonnalité. Deux principaux types de climats se distinguent donc : *les climats toujours pluvieux, dits équatoriaux*, et *les climats à saisons alternées, dits tropicaux*. Les premiers peuvent se rencontrer assez loin de l'équateur géographique, alors que les seconds sont représentés jusqu'à des latitudes très basses.

● Les climats équatoriaux

Le terme équatorial ne devrait s'appliquer qu'aux régions de basses latitudes, où la pluviométrie est générée, le long de l'équateur météorologique, par la convergence intertropicale. Or, rares sont les régions de la planète où la convergence intertropicale se stabilise tout au long de l'année : Panama, Nouvelle-Guinée. Les plus vastes ensembles de climats équatoriaux doivent la pérennité de leur pluviosité à plusieurs mécanismes pluviogènes, impliquant des paramètres d'échelle locale : topographie,

¹¹ Plus de 3 000 stations.

¹² NOAA, LMD, IRD, IPCC.

couvert végétal. Ces régions sont marquées par une certaine monotonie des conditions météorologiques au cours de l'année.

Les vents sont rares et faibles, hormis les brises de mer et de terre d'alternance régulière. La brise de mer pénètre souvent largement sur le continent¹³, créant des convergences supplémentaires responsables d'un fort accroissement de la pluviosité.

Les régimes thermiques sont peu contrastés. La température moyenne annuelle tourne autour de 26-27°C, non seulement sur les côtes, mais également loin dans l'intérieur. Les contrastes saisonniers sont faibles ; l'écart entre les températures moyennes mensuelles extrêmes est de 3°C à Franceville (Gabon), 2,1°C à Manaus (Brésil), 1,3°C à Singapour, 1,2°C à Cayenne, inférieur à 1°C aux îles Marshall. Si les matinées sont assez souvent belles, le ciel se charge vite, avec des grains de fin d'après-midi, un peu plus tardifs sur la côte que dans l'intérieur. Ainsi se justifie la faiblesse annuelle de l'insolation qui n'atteint jamais la moitié des 4 000 heures théoriquement possibles, avec des minima très bas dans les zones côtières : 1 200 au maximum sur la côte pacifique de la Colombie.

Les précipitations sont toujours abondantes, tombant sous forme d'averses, souvent violentes ; elles dépassent partout 1,50 m par an, parfois 2 m. Les volumes maximaux caractérisent les côtes : Gabon, Cameroun, Guyanes. Mais, même à l'intérieur des continents, les pluies restent considérables : plus de 2 m dans le bassin amazonien, au pied des Andes comme au centre. Le nombre de jours de pluie est élevé ; il peut exceptionnellement atteindre 300, comme sur la côte de Colombie, donnant entre 9 et 10 m de pluie par an à Quibdo ou Buenaventura. Dans ces climats sans saison sèche, les conditions climatiques sont vraiment insalubres pour l'homme.

● **Les îles et les façades orientales des continents**

Il existe des climats toujours pluvieux à des latitudes plus élevées, là où se placent ordinairement des climats à alternance saison sèche/saison des pluies. Entre les tropiques, sur les îles, comme sur les façades orientales, le climat est avant tout commandé par le flux d'alizé, quasi permanent, qui, après avoir couvert un trajet maritime long, est proche de la saturation en vapeur d'eau. Îles et côtes peuvent être fort arrosées, tout au moins sur les versants au vent, exposés à l'est (par opposition aux versants sous le vent).

Ainsi aux îles Hawaï, à 19° Nord, il tombe jusqu'à 12 m de pluie par an sur les versants nord orientaux, contre parfois 0,5 m sur les versants sud-ouest, à quelques kilomètres de distance. Il en est de même à la Réunion où, côté au vent, Sainte-Rose reçoit 3,3 m de pluie en 212 jours. La station a un maximum d'été, mais il n'y a aucun mois sec ; comme le dit l'adage local : « *il y a deux saisons : la saison des pluies et la saison pluvieuse* » !

Ces climats intéressent d'abord des archipels au milieu de l'océan. À l'est des bassins océaniques, l'alizé issu du continent est encore sec et les îles sont fréquemment sub-désertiques : Canaries, îles du Cap vert. Au contraire, au centre et à l'ouest des océans, le climat d'alizé trouve sa pleine vigueur : îles du Pacifique central et occidental, domaine caraïbe, îles de l'océan Indien. Plus encore, il souffle sur de longues façades orientales : côtes orientales de Madagascar, de l'Afrique méridionale et orientale, façade sud-est du Brésil, Amérique centrale caraïbe.

13 Parfois jusqu'à 70-80 km.

Les régions riveraines des parties occidentales des océans (dont la température de surface est élevée), présentent une pluviométrie maximum en septembre-octobre dans l'hémisphère nord¹⁴, et février-mars dans l'hémisphère sud¹⁵. Cette pointe correspond aux passages des cyclones, certes peu nombreux, mais susceptibles de déverser plusieurs centaines de millimètres de pluie en moins de 24 heures.

● **Les climats tropicaux à saisons alternées**

Ils peuvent se rencontrer à l'équateur géographique (Sao Tomé), mais couvrent l'essentiel de la zone intertropicale, en allant vers les tropiques. Ils sont caractérisés par l'alternance d'une saison humide et d'une saison sèche. La saison des pluies dure au moins trois mois, ce qui différencie ces climats des déserts. La saison sèche dure au moins deux mois, à la différence des climats toujours pluvieux.

La saison humide, légèrement décalée par rapport au mouvement apparent du soleil (de mai à octobre dans l'hémisphère nord) se marque par une nébulosité assez importante, des températures chaudes mais non torrides (25-26°C), des amplitudes thermiques réduites par l'effet de serre, des précipitations plus ou moins continues de mousson et des averses brèves, accompagnées de coups de vent au passage des perturbations : ondes d'est, lignes de grain.

La saison sèche d'alizé (ce dernier est appelé harmattan en Afrique occidentale) se caractérise au contraire par des températures moyennes torrides (28-30°C), une évaporation potentielle intense, la sécheresse de l'air, le ciel clair. La durée de la saison sèche est fonction de l'éloignement par rapport à l'équateur météorologique. En Afrique occidentale, on passe progressivement des climats tropicaux humides, à saison des pluies dépassant six mois, aux climats tropicaux secs, de type sahélien.

● **Les climats tropicaux d'altitude**

Ces climats représentent, à l'échelle du globe, de très faibles étendues. On les trouve dans les Andes, dans l'Himalaya, ainsi que sur des chaînes de montagnes isolées présentant des altitudes élevées. Les caractéristiques de ces climats sont de faibles températures moyennes, des écarts de température diurnes très élevés et des niveaux de rayonnement élevés. La pluviométrie peut y être extrêmement variable et dépendante de la topographie et du régime climatique dans lesquels elles sont insérées.

14 Exemple : Le Raizet, en Guadeloupe.

15 Exemple : Tamatave, à Madagascar.