



Institut de Recherche pour le Développement IRD

Université d'Orléans

**« Changement climatique: Rapide bilan des
connaissances scientifiques »**

Conférences sur les changements climatiques

le 17 mars 2011

JERZY J. NIZINSKI

Institut de Recherche pour le Développement, I.R.D.,
UMR 211 « BIOEMCO – *Interactions biologiques dans les sols* »
Centre d'Orléans, 5 rue du Carbone, 45072 Orléans cedex 2, téléphone: (33)2-38-49-95-25,
fax: (33)2-38-49-95-76; courriel: georges.nizinski@ird.fr



Institut de Recherche pour le Développement IRD

Université d'Orléans

**« Changement climatique: Rapide bilan des
connaissances scientifiques »**

Conférence sur les changements climatiques

2011

JERZY J. NIZINSKI

Institut de Recherche pour le Développement, I.R.D.,
UMR 211 « BIOEMCO – *Interactions biologiques dans les sols* »
Centre d'Orléans, 5 rue du Carbone, 45072 Orléans cedex 2, téléphone: (33)2-38-49-95-25,
fax: (33)2-38-49-95-76; courriel: georges.nizinski@ird.fr

LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR DANS DES REVUES SCIENTIFIQUES

1. Nizinski J.J., Galat-Luong A. et Galat G., 2011. Etude de la conductivité hydraulique des troncs d'hévéa : cas d'une plantation en Côte d'Ivoire. Revue d'Ecologie (La Terre et La Vie)
2. Nizinski J.J., Galat G. et Galat-Luong A., 2011. Actual evapotranspiration and canopy resistance measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). Arid Ecosystems - Aridnye Ekosistemy
3. Nizinski J.J., Galat-Luong A. et Galat G., 2011. Echanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux: cas d'une savane et d'une plantation. Revue d'Ecologie (La Terre et La Vie)
4. Galat G., Galat-Luong A. et Nizinski J.J., 2011. Is Lord Derby's Eland, the world's largest antelope, able to adapt its diet if dryness? Animal biology
5. Nizinski J.J., Galat G. et Galat-Luong A., 2011. Bioclimatological analysis of the bark necrotic rubber tree in Côte d'Ivoire plantations. Russian Agricultural Science, n°37, vol. 1, 21-29
6. Nizinski J.J., Galat G. et Galat-Luong A., 2011. Water balance and sustainability of Eucalyptus plantations in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). Russian Journal of Ecology - Ekologiya, vol. 42, n°2 36-42
7. Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G. et Lhomme J.P., 2010. L'intérêt de l'utilisation *in situ* des sondes psychrométriques de Dixon-Tyree: cas d'une plantation d'hévéa en Côte d'Ivoire. Climatologie, vol. 7, 108-121
8. Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G., Dingkuhn M. et Fabre D., 2009. Evapotranspiration réelle et résistance du couvert d'une savane à *Loudetia arundinacea* (bassin du Kouilou, Congo-Brazzaville). Climatologie, vol. 6, 33-45
9. Nizinski J.J., Galat-Luong A. et Galat G., 2009. Aspects bioclimatiques de nécrose corticale de l'hévéa. Geographia Technica, 355-360
10. Galat G., Galat-Luong A. et Nizinski J.J., 2009. L'impact du changement climatique sur les variations des populations de grands vertébrés à leur extrême limite de répartition est-il fonction de leurs régimes alimentaires ? Geographia Technica, 205-210
11. Galat-Luong A., Galat G. et Nizinski J.J., 2009. En extrême limite nord de répartition, le réchauffement climatique a conduit les chimpanzés à filtrer leur eau de boisson. Geographia Technica, 199-204
12. Galat G., Galat-Luong A. et Nizinski J.J., 2009. Increasing dryness and regression of the distribution area of the Northern most Western red colobus *Procolobus badius temminckii*. Mammalia, n° 73, 365-368
13. Nizinski J.J., Morand D., Loumeto J.-J., Galat-Luong A. et Galat G., 2008. Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une plantation dans le bassin du Kouilou (Congo-Brazzaville). Climatologie, vol. 5, 99-112
14. Deans J.D., Edmunds W.M., Lindley D.K., Gaye C.B., Dreyfus B., Nizinski J.J., Neyra M. et Munro R.C., 2004. Nitrogen in interstitial waters in the Sahel: Pollutant or resource. Plant and Soil, 3, 1-16
15. Deans J.D., Diagne O., Nizinski J.J., Lindley D.K., Seck M., Ingleby K. et Munro R.C., 2002. Comparative growth, biomass production, nutrient use and soil amelioration by nitrogen-fixing tree species in semi-arid Senegal. Forest Ecology and Management, vol. 176, 253-264
16. Nizinski J.J., Loumeto J.J., Ayoma M.-B., Mabilia-N'goma A. et Nsemi R.N., 2002. Evapotranspiration réelle de la plantation d'Eucalyptus (bassin du Kouilou, Congo). Annales de l'Université de Marien Ngouabi (Congo-Brazzaville), n° 3(1), 59-71
17. Nizinski J.J., Loumeto J.J., Ayoma M.-B., Mabilia-N'goma A. et Nsemi R.N., 2001. Durabilité de plantations d'Eucalyptus dans le bassin du Kouilou (Congo). Le Flamboyant, n° 54, 14-17
18. Laclau J.-P., Bouillet J.-P., Nizinski J.J. et Nzila J.-D., 1999. Etude de l'impact de la plantation d'Eucalyptus sur la fertilité des sols de savane autour de Pointe-Noire (Congo). Le Flamboyant, n°39, 26-28
19. Nizinski J.J., Morand D. et Fournier Ch., 1994. Actual evapotranspiration of a thorn scrub with *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca* (North Senegal). Agricultural and Forest Meteorology, vol. 69, n°5, 93-111
20. Berger A., Fournier Ch., Nizinski J.J. et Grouzis M., 1993. Deux ans de suivi *in situ* de la contrainte hydrique sur *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*. Bois & Forêts des Tropiques, vol. 238, n° 4, 21-34
21. Nizinski J.J., Morand D. et Fournier Ch., 1992. Le rôle du couvert ligneux sur le bilan hydrique d'une steppe (Nord du Sénégal). Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXVII, n°2, 225-236
22. Dayau S., Valancogne Ch., Morand D. et Nizinski J.J., 1992. *Note technique* - Estimation du flux de sève du kiwi par bilan de chaleur en conditions semi-contrôlées. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXVII, n° 2, 375-381
23. Nizinski J.J. et Saugier B., 1989. Dynamique de l'eau sous chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. Annales des Sciences Forestières, vol. 46, n° 2, 173-186
24. Nizinski J.J. et Saugier B., 1989. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. Agricultural and Forest Meteorology, 47, 1-17
25. Nizinski J.J., Morand D. et Saugier B., 1989. Variation of stomatal resistance with leaf age in *Quercus petraea*: Effect on the soil-water balance of an oak forest. Annales des Sciences Forestières, vol. 46 suppl., 429s-432s
26. Nizinski J.J., Morand D. et Saugier B., 1989. Modélisation du bilan de l'eau d'une forêt. Application à une futaie de chênes. Bulletin d'Ecologie, vol. 20, n° 1, 69-72
27. Morand D., Nizinski J.J. et Saugier B., 1989. Adaptation au niveau de disponibilité en azote, en peuplements herbacés. Deux exemples: *Anthoxanthum odoratum* L. et *Arrhenatherum elatius* J. et C. ex Presl var. *vulgare* Koch. Bulletin d'Ecologie, vol. 20, n° 1, 73-75
28. Morand D. et Nizinski J.J., 1989. L'intérêt phytothérapeutique de l'arbre à thé (*Melaleuca alternifolia*). La Lettre Phytothérapeutique du Pharmacien, 9, 4-10
29. Nizinski J.J. et Saugier B., 1988. A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. Journal of Applied Ecology, vol. 25, n° 2, 643-652
30. Nizinski J.J. et Saugier B., 1988. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. Acta Oecologica/Oecologia Plantarum, vol. 9/23, n° 3, 311-329
31. Nizinski J.J., 1987. Résumé de la thèse. Bulletin d'Ecologie, vol. 18, n° 1, 73-75
32. Saugier B., Halldin S., Pontailier J.-Y. et Nizinski J.J., 1985. Bilan hydrique de forêts de chênes et de hêtres à Fontainebleau. Mesures et modélisation. Revue du Palais de la Découverte, vol. 13, n° 130, Juillet-Août-Septembre, 187-200

Ce dossier contient:

1. INTRODUCTION.....	3
2. ENERGIE ARRIVANT AU SOMMET DE L'ATMOSPHERE.....	3
3. LA CRYOSPHERE.....	4
4. LES MASSES OCEANIQUES.....	5
5. LES MASSES CONTINENTALES.....	6
5.1. MORPHOLOGIE.....	6
5.2. LES SURFACES CONTINENTALES.....	7
5.3. LE VOLCANISME.....	9
6. L'ATMOSPHERE.....	10
6.1. L'EFFET DE SERRE.....	10
6.2. CO, CO₂, CH₄, L'EQUILIBRE EST ROMPU.....	11
6.3. LE PROBLEME DE LA COUCHE D'OZONE.....	14
7. L'ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES D'APRES L'ACADEMIE DE L'AGRICULTURE DE FRANCE.....	15
8. CRITIQUES DU GIEC - GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAUX SUR LE CLIMAT.....	18
9. DOMAINE D'ETUDE DE LA BIOCLIMATOLOGIE.....	23
10. CARTOGRAPHIER LA PRODUCTION VEGETALE.....	27
11. CLIMATS, FORMATIONS VEGETALES ET ENVIRONNEMENT PHYSIQUE.....	29
12. APPROCHE GENERALE DE LA CROISSANCE.....	37
13. PHOTOSYNTHESE ET MESURES DE PHOTOSYNTHESE.....	41
14. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO).....	44
15. ÉTUDE ET MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX: CAS D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION.....	58

1. INTRODUCTION

L'équilibre de la biosphère n'a jamais été menacé par aucune des espèces vivantes qui l'ont peuplée jusqu'à l'époque très récente où émergea l'homme, le pire des ravageurs que l'univers ait connu.

Dans l'histoire humaine, le feu est le premier acquis technologique de l'humanité mais nos lointains ancêtres, fort peu nombreux, n'exerçaient sur le milieu naturel qu'une action très limitée. En ce sens, il faisait partie intégrante des écosystèmes. Mais dès que les chasseurs paléolithiques disposèrent du feu, ils se mirent à causer sur ce milieu naturel une action hors de proportion avec leurs faibles effectifs.

Le couvert végétal s'en ait déjà trouvé à jamais dégradée. Le feu avait pour but de favoriser la constitution de zones herbacées à la place des forêts.

Ensuite, au néolithique, l'impact de l'homme sur la biosphère s'accrut avec la découverte de l'agriculture et de l'accroissement démographique sans précédent qui en résulta. La destruction des végétations naturelles fut souvent un prélude à l'aridification ou à la désertification de terres livrés à la culture ou au pâturage.

Aujourd'hui, la société technologique contemporaine a été capable de participer à un phénomène aussi majeur que le réchauffement d'une planète.

Le climat dépend de nombreux facteurs, nous allons les résumer en cinq grands points et nous dirons en quoi l'homme intervient pour avoir une part de responsabilité dans le réchauffement climatique.

2. ENERGIE ARRIVANT AU SOMMET DE L'ATMOSPHERE

Le climat dépend de l'énergie arrivant au sommet de l'atmosphère, ce phénomène est contrôlé par des phénomènes astronomiques. Donc, l'Homme ne peut intervenir à ce niveau.

Quels sont ces phénomènes astronomiques ? Il est ainsi possible d'en faire une liste qui les classe :

* **Le premier** correspond à la variation de l'inclinaison de l'axe de la Terre sur le plan de son orbite. Lorsque l'inclinaison est forte, les zones de hautes latitudes reçoivent plus d'énergie mais moins en hiver, ce qui amplifie les contrastes saisonniers. Le phénomène inverse se produit en période de faible inclinaison ;

* **Le second** facteur est la position de la Terre sur son orbite autour du Soleil à une date donnée. Elle varie avec une périodicité qui comprend des périodes

dominantes de 19.000 et 23.000 ans. Ainsi la terre est actuellement plus proche du Soleil pendant l'hiver boréal que durant l'été. Il y a 11.000 ans, c'était le phénomène inverse qui se produisait. La Terre était alors plus près du Soleil pendant l'été boréal. Cette configuration conduit à des étés plus chauds et des hivers plus froids aux hautes latitudes qui recouvraient le Nord de l'Europe et le Canada. Nous vivons dans cette période interglaciaire depuis une dizaine de millénaires ;

* **Le dernier facteur** est la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre avec des périodicités de 100.000 à 400.000 ans.

Ces variations astronomiques de l'insolation servent de facteurs déclenchant pour toute une série d'autres phénomènes qui ont alors pour l'effet d'amplifier les modifications climatiques.

3. LA CRYOSPHERE

Le climat dépend de l'état de la cryosphère, étendues glacées océaniques ou continentales, dépend de leur superficie et de l'état de leur surface. L'Homme peut intervenir à ce niveau en étant à l'origine de poussière qui passent dans la circulation atmosphérique et peuvent de déposer sur les glaces. L'Homme a une action sur le bilan énergétique au niveau de ces surfaces de glaces en modifiant le rapport entre l'énergie incidente et l'énergie réfléchi par la glace.

Une glace recouverte de poussière absorbe plus d'énergie, aurait donc tendance à fondre, c'est une contribution au réchauffement climatique, bien qu'elle soit bien moindre que celle due au volcanisme, le phénomène naturel majeur qui injecte des particules dans l'atmosphère.



Figure n°1 – La cryosphère

4. LES MASSES OCEANIQUES

Le climat dépend de l'état physique et chimique des masses océaniques. Les activités humaines peuvent intervenir à ce niveau. On constate un réchauffement des eaux de surface en de nombreux points et une tendance à la modification de la circulation des courants océaniques. Nous verrons plus loin que l'Homme est à l'origine de la pollution thermique des eaux continentales qui se retrouvent à plus ou moins long terme dans les océans (voir chapitre des eaux continentales) et qui contribuent ainsi au réchauffement des eaux océaniques. Ainsi, de faibles changements de température peuvent exercer une influence catastrophique sur les biocénoses (ensemble des êtres vivants) aquatiques.

Au cours des années 60, la pollution des eaux, tant continentales qu'océaniques, c'est accru à un rythme inquiétant. L'immense majorité des substances polluantes, quelles soient gazeuses, liquides ou solides, sont susceptibles de contaminer l'hydrosphère. Ces substances polluantes sont :

- le plomb ;
- le mercure ;
- les nitrates ;
- les hydrocarbures ;
- les détergents (substances organiques de synthèse ; exemple les détergents) ;
- les pesticides ;
- les polychlorobiphényles (PCB ; exemple : les matières plastiques utilisées dans les industries) ;

Tous ces polluants modifient l'équilibre des êtres vivants de ce milieu.

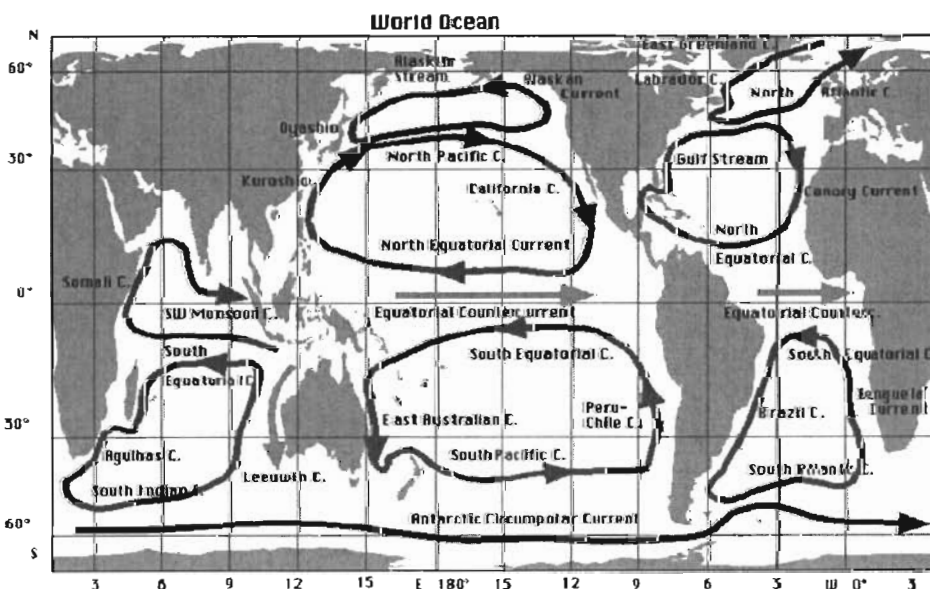


Figure n°2 – Les océans – les principaux courants.

5. LES MASSES CONTINENTALES

Le climat dépend de l'état des masses continentales

5. 1. MORPHOLOGIE

Le climat a dépendu de la morphologie des continents qui a varié au cours des temps géologiques. Des périodes globales glaciaires ont alterné avec des périodes globales chaudes. Les continents ne se contentent pas de subir le climat, ils en sont acteurs : la tectonique des plaques déplace les continents, modifient leurs morphologie en équilibre avec circulation atmosphérique et océanique.

Les supercontinents (comme Figure n°3 – la Pangée de Wegener) ont favorisé l'émergence de grandes régions arides, mais si le supercontinent vient à se disloquer, des masses d'air humides peuvent pénétrer jusqu'au cœur des continents, donnant lieu à des précipitations et ainsi favoriser l'altération chimique des roches qui consomment du CO₂ atmosphérique : le taux de CO₂ a pu changer sous le contrôle de la géographie des continent. Sur ce point, l'Homme n'intervient évidemment pas.

La Pangée de Wegener

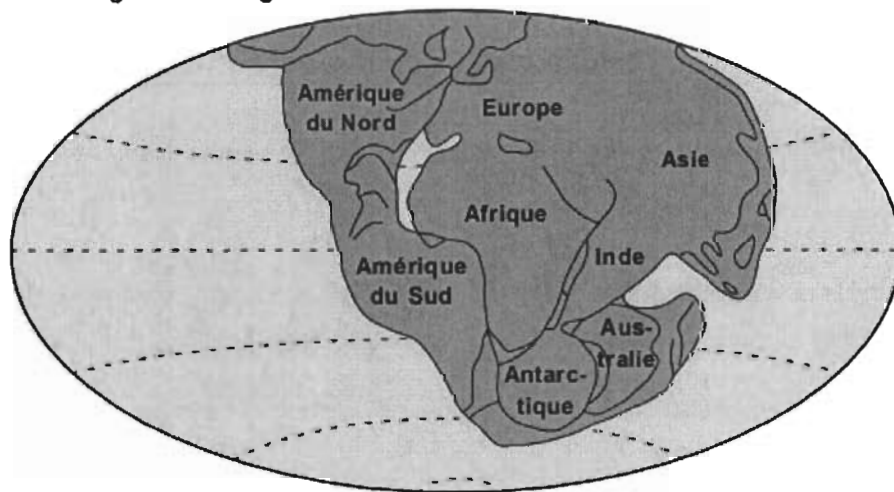


Figure n°3 – La Pangée de Wegener.

5. 2. LES SURFACES CONTINENTALES

Le climat dépend de l'état de surface des continents, de la proportion entre les surfaces strictement minérales et les surfaces portant une couverture végétale, celle-ci allant de la forêt dense à des zones herbacées denses jusqu'à des zones où sol nu domine. Les activités humaines interviennent de façon essentielle à ce niveau.

Depuis le néolithique, l'Homme a déboisé, le pourcentage de surface de forêt recule au profit des zones herbacées, des zones agricoles, des zones de sols nus. Une fois déboisé, il y a des sols riches sur lesquels la forêt pourra naturellement se réinstaller, mais ce n'est pas le cas des sols pauvres sur lesquels seuls des landes ou de l'herbe pourront se développer, dans le pire cas de figure, certains sols resteront nus (désertification).

Avec le déboisement, l'Homme perturbe deux cycles majeurs : le cycle de l'eau et le cycle de carbone.

5. 2. 1. L'HOMME PERTURBE LE CYCLE DE L'EAU

Les continents sont le siège d'échange d'énergie (énergie solaire arrivant au sol) et de vapeur d'eau entre l'atmosphère, la végétation, le sol et les surfaces d'eaux libres.

Le sol et les surfaces d'eaux libres perdent de l'eau : c'est le phénomène de l'évaporation. La végétation absorbe l'eau du sol pour assurer son fonctionnement et la retransmet à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau : c'est le phénomène de la transpiration. Evaporation et transpiration se cumulent dans le phénomène de l'évapotranspiration qui est étudié par la bioclimatologie (voir chapitre 9. DOMAINE D'ETUDE DE LA BIOCLIMATOLOGIE) et écophysiologie. Le remplacement d'une forêt par une zone herbacée a pour bilan de faire augmenter la température du climat local et de faire diminuer les pluies (aridification et désertification) (voir chapitre 14. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO) et chapitre 15. ÉTUDE ET MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX: CAS D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION).

En déboisant l'Homme modifie les climats locaux et régionaux, favorise les climats plus chauds et plus secs, ce qui a une incidence sur le climat global terrestre.

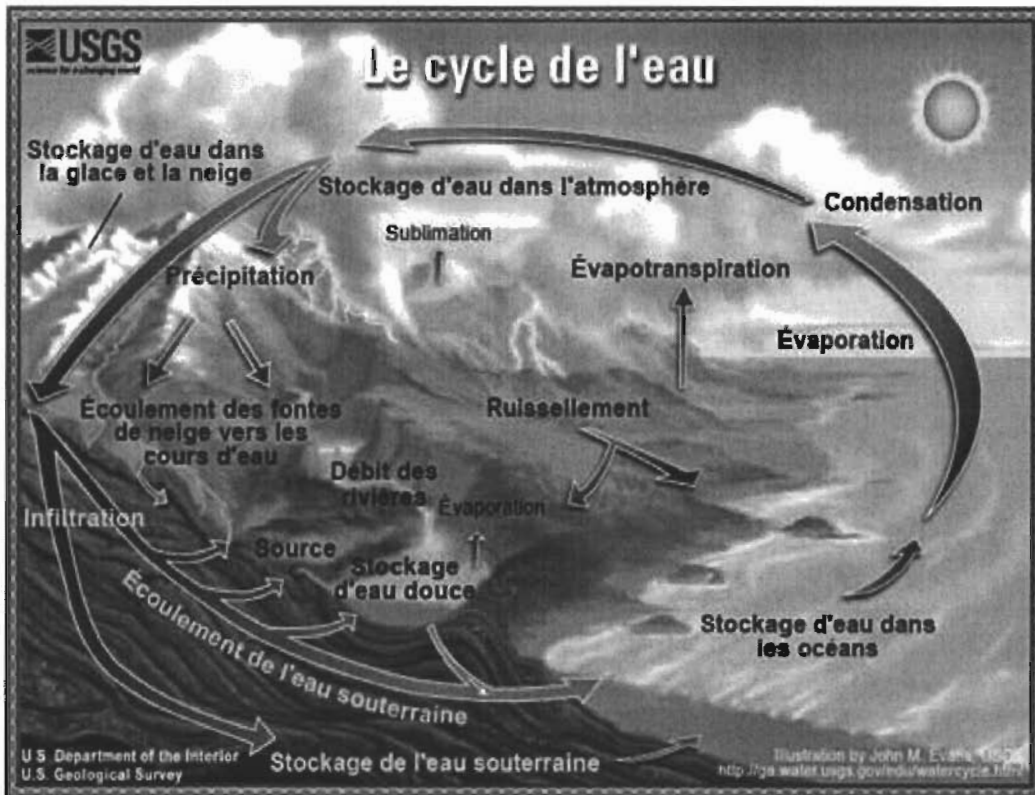


Figure n°4 – Cycle de l'eau

5.2.2. L'HOMME PERTURBE LE CYCLE DU CARBONE

La végétation est le siège de deux phénomènes biologiques qui conditionnent la circulation de carbone dans la biosphère : la photosynthèse et la respiration (voir chapitre 12. APPROCHE GENERALE DE LA CROISSANCE et chapitre 13. PHOTOSYNTHESE ET MESURES DE PHOTOSYNTHESES).

Le cycle du carbone rend compte des échanges de carbone entre l'atmosphère (sous forme de CO_2), la végétation (tissus constitués de C, H, O, qui sont un réservoir de carbone), le sol (l'humus, molécules constituées de C, H, O, qui constituent un autre réservoir de carbone). Les tissus végétaux ont pour origine le CO_2 atmosphérique. En déboisant, l'Homme fait passer à plus ou moins long terme le carbone du végétal qui était sous forme de matière vivante à l'état de CO_2 atmosphérique et contribue donc à l'augmentation de CO_2 atmosphérique (effet de serre) donc au réchauffement climatique.

Les matières végétales fossiles : Le carbone, le pétrole, les goudrons sont des végétaux fossiles datant du carbonifère, des hydrocarbures fossiles (molécules composées de C, H, O, N, S,...). En utilisant ces hydrocarbures fossiles, l'Homme défait ce que la nature a fait, fait passer le carbone de l'état de tissus végétaux à l'état de CO_2 atmosphérique (augmentation de l'effet de serre) et contribue au réchauffement climatique.

Le déboisement : Depuis le néolithique, les forêts ont été progressivement défrichées pour y aménager des cultures et des pâtures, pour construire des villages et des villes. Le bois a été utilisé comme matériau de construction, de chauffage, comme source d'énergie générale et ensuite en particulier dans l'industrie. Dans les pays riches, le bois a été unique source d'énergie jusqu'au XIX^{ième} siècle et est toujours l'unique source d'énergie pour certains pays pauvres. Le déboisement a suivi l'essor démographique humain.

5. 2.3. LES EAUX CONTINENTALES

Le problème de la pollution des eaux est un des aspects les plus inquiétants de la dégradation du milieu naturel dans les pays riches comme dans les pays pauvres. **Le rejet de chaleur** dans l'environnement, dans les eaux continentales et littorales agit sur un facteur écologique essentiel : la température du milieu. Localement les eaux continentales se réchauffent ; ce réchauffement est dû au rejet d'eaux chaudes. La cause essentielle de la pollution thermique des eaux provient de la production d'électricité, qu'elle soit d'origine thermique classique ou qu'elle soit d'origine nucléaire. Les besoins considérables en eau de refroidissement des centrales nucléaires sont tels que le volume d'eau disponible des fleuves peut devenir insuffisant et conduire à l'utilisation des eaux souterraines.

Les villes sont aussi de grandes productrices d'eaux chaudes. Dans les pays riches très industrialisés dès la fin des années 60, la pollution thermique atteignait déjà des niveaux importants avec une élévation de la température des cours d'eau de 7 à 10 °C. On donnera un exemple de pollution thermique : une centrale électrique de 5.000 Mégawatts dégage par jour assez de chaleur pour élever de 3 °C la température de $6,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau sur une épaisseur de 5 mètres. Une fois rejetée à la mer, cette masse occuperait une surface de 56 km². Les courants et l'agitation de surface de la mer interviennent de façon efficace pour diluer cette zone plus chaude ; néanmoins, ce phénomène participe au réchauffement global des eaux océaniques.

La pollution thermique des eaux continentales et littorales a déjà atteint une telle ampleur qu'elle menace l'ensemble des êtres vivants, animaux et végétaux, de ce milieu.

5. 3. LE VOLCANISME

Le volcanisme est un phénomène qui a participé et qui participe toujours à la constitution du climat terrestre.

Les volcans libèrent du CO_2 et de H_2O , gaz à l'effet de serre, et des particules solides dans l'atmosphère qui sont à l'origine de la constitution de nuages opaques au rayonnement solaire avec pour l'effet la chute des températures dans les hautes couches de l'atmosphère et au sol. Par ces activités, l'Homme est aussi à l'origine de l'émission de particules solides (aérosols) dans l'atmosphère qui ont le même effet sur le climat que les particules solides du volcanisme. Nous en parlons ici, même si ces particules ne participent pas directement au phénomène du réchauffement climatique car il s'agit d'une pollution qui accompagne les émissions de gaz à effet de serre.



Figure n°5 – Eruption volcanique - les volcans libèrent du CO_2 et de H_2O , gaz à l'effet de serre, et des particules solides dans l'atmosphère

6. L'ATMOSPHERE

Le climat dépend de l'état physique et chimique de l'atmosphère. C'est au niveau de l'effet de serre que les activités humaines interviennent et de façon majeur.

6. 1. L'EFFET DE SERRE

L'énergie solaire arrive au sommet de l'atmosphère, le système « Atmosphère » est le siège de phénomènes physiques complexes (énergétique, rayonnement de diverses longueurs d'ondes) en interaction avec le système « Terre » (océans, glaces, sols, végétations) qui donne naissance aux climats et conditionne la température au niveau de la surface terrestre (voir chapitre 11 - CLIMATS, FORMATIONS VEGETALES ET ENVIRONNEMENT PHYSIQUE) : si la composition chimique de l'atmosphère est modifiée, ces phénomènes le sont aussi.

La plupart des gaz atmosphériques n'absorbent pas les radiations solaires, c'est le cas des trois gaz principaux : l'azote ($N_2 - 78,09 \%$), l'oxygène ($O_2 - 20,95 \%$) et l'argon ($A - 0,93 \%$). En revanche, le gaz carbonique CO_2 , le méthane CH_4 , la vapeur d'eau H_2O , les oxydes d'azotes N_2O et l'ozone O_3 absorbent une partie du rayonnement solaire dans l'infrarouge, radiations qui transportent une grande énergie thermique, ces gaz réabsorbent aussi les rayons infrarouges émis par les continents et les océans : ces gaz produisent un « effet de serre », ils agissent comme la vitre d'une serre qui piège les radiations thermiques en élevant la température dans les couches basses de l'atmosphère. Les activités humaines produisent des gaz à effet de serre : on constate l'augmentation depuis la fin du XIX^{ième} du CO , CO_2 , CH_4 et autre gaz de l'atmosphère, molécules contenant du carbone.

Cette augmentation peut-être à l'origine d'une hausse de température à la surface de la terre.

6. 2. CO , CO_2 , CH_4 , L'EQUILIBRE EST REMPLU

6. 2.1. CO

Le CO , monoxyde de carbone, est le plus abondant de tous les polluants atmosphériques ; en conditions naturelles, son taux est de 0,05 à 0,2 ppm (0,11 ppm en moyenne).

Quelles sont les sources naturelles de CO ? Celles-ci sont le volcanisme, les zones herbacées anaérobies, les orages, les feux naturels, les êtres vivants marins et végétaux (l'océan pourrait être la principale source de CO).

Quelles sont les activités humaines à l'origine du CO ?

* Le moteur à essence est la principale source d'émanation de CO (l'émission est maximale lorsque le moteur est froid ou fonctionne avec un mélange trop riche) ;

* La combustion du charbon, du bois, des incendies de forêts et de savanes allumés par l'Homme.

Mais la concentration de CO dans l'atmosphère reste assez constante car ce sont des bactéries du sol qui l'absorbe pour transformer en CO_2 et/ou en CH_4 .

6. 2.2. CO_2

Son taux augmente sans cesse depuis la fin du XIX^{ième}. Il est passé de 280 ppm en 1850 à 380 ppm aujourd'hui. Les sources naturelles de CO_2 sont : la respiration des êtres vivants, animaux et végétaux, la fermentation et le

volcanisme. La source de CO₂ issue des activités humaines est l'utilisation à grande échelle des énergies fossiles.

6. 2.3. CH₄

Le méthane est fabriqué en majeure partie par des bactéries qui se nourrissent de matière organique dans les milieux pauvres en oxygène et humides tels que les sédiments, les marais, les rizières, les décharges d'ordures et les tubes digestifs des animaux. Au cours des temps géologiques, une partie de ce méthane a été piégé (et continue à l'être dans les sédiments) : il constitue 90 % du gaz naturel exploité. CH₄ est par ailleurs un constituant naturel de l'atmosphère. Il existe un autre réservoir de carbone fossile fait de CH₄ : les clathrates, des hydrates de CH₄, solides, sur les marges continentales océaniques (eau froide, pression élevée, bactéries productives de CH₄). Ils sont instables si la température augmente ou si la pression diminue, ce qui peut arriver lors d'un réchauffement de l'eau ou d'un glissement de terrain sous-marin. On commence à étudier leur rôle possible dans les changements climatiques passés et dans le réchauffement climatique actuel. S'il y a dégazage de ce méthane, il se retrouve dans l'atmosphère.

Le CH₄ est un gaz à effet de serre important, 30 fois plus absorbant que la molécule de CO₂. L'augmentation de la concentration en CH₄ de l'atmosphère au cours du siècle dernier semble due à l'augmentation des émissions liées aux activités humaines : exploitation du gaz naturel (fuites), décharges, accroissement des zones agricoles irriguées (rizières) et augmentation du nombre de têtes de bétail.

Quand l'action des hommes concernant les émissions de méthane a-t-elle commencé ?

Selon Ruddiman, cela a commencé avant la période industrielle, il y a 8.000 ans, au début de l'agriculture et en particulier de la culture du riz, ce qui aurait empêché une nouvelle entrée en glaciation. Mais d'autres chercheurs attribuent cette augmentation au développement des principaux grands deltas à la même époque (le Nil, le Niger, le Mississippi et l'Amazone).

Le méthane et le bétail : en Nouvelle-Zélande, la production du méthane par l'appareil digestif des moutons est la première contribution de gaz à effet de serre (c'est un pays qui a une politique industrielle de non-pollution), les agronomes expérimentent des changements d'alimentation du bétail pour réduire ces émissions.

6. 2.4. L'HOMME A REMU L'EQUILIBRE DU CYCLE DU CARBONE

L'Homme a rompu l'équilibre naturel du cycle du carbone en éjectant dans l'atmosphère essentiellement du CO₂, CH₄, qui est des gaz à effet de serre.

On peut comparer l'atmosphère à une baignoire qui serait alimentée en carbone par des robinets (les scientifiques parlent de « sources ») qui seraient vidées par des tuyaux d'évacuation (les scientifiques parlent ici de « puits »).

Quelles sont les sources naturelles de carbone ? Comme nous l'avons vu précédemment, les sources naturelles de carbone sont les êtres vivants, la fermentation des zones humides et le volcanisme.

Quels sont les puits qui permettent au carbone de s'échapper ? Ces puits sont la végétation qui fixe le carbone par la photosynthèse, le sol qui stocke les végétaux morts, les océans dans lesquels se dissout le CO₂ et qui contient le phytoplancton qui fixe le CO₂ dissous.

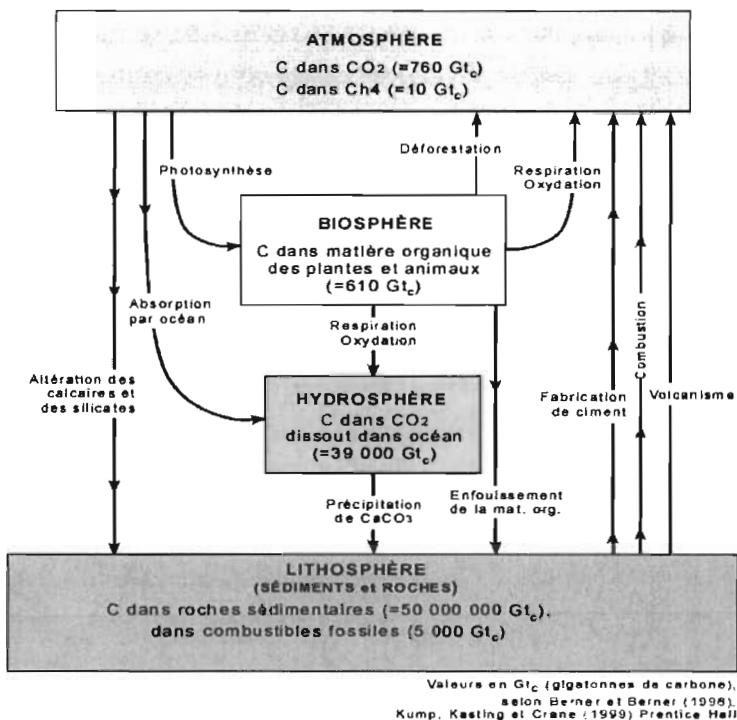
Les grands stocks de carbone sur terre sont les énergies fossiles (pétroles et gaz, 5.000 Gt), les sols gelés des régions polaires et subpolaires (permafrost, 1.400 Gt), les clathrates (hydrates de CH₄ fossiles océaniques, 1.200 Gt), les grandes forêts tropicales et boréales (830 Gt), les tourbières (constituées d'un empilement de matière organique de plusieurs centaines de mètres, 500 Gt). Ces stocks de carbone sont susceptibles de devenir des sources de carbone pour l'atmosphère en fonction des conditions environnementales auxquelles ils sont soumis. Or, un réchauffement déjà effectif peut être le déclencheur d'un tel phénomène : ces stocks sont donc de « bombes à retardement » qui provoqueraient l'emballement du réchauffement climatique.

L'Homme a rompu l'équilibre naturel du cycle du carbone en déboisant, par ses pratiques agricoles, en brûlant les combustibles fossiles : en créant des sources de carbone artificielles qui atteignent 7 Gt an⁻¹, et ce chiffre devrait doubler dans les 50 prochaines années si l'Homme ne modifie pas sa technologie.

Jusqu'à récemment, la végétation et l'océan ont joué leur rôle de puits de carbone, ont absorbé le carbone supplémentaire injecté par l'Homme dans l'atmosphère mais cet équilibre est rompu : les teneurs en CO₂ et en CH₄ de l'atmosphère augmentent.

Nous pouvons donner l'exemple de la canicule qui a touché l'Europe en 2003, phénomène rare qui pourrait devenir fréquent : la végétation absorbe du CO₂ pour sa photosynthèse à condition qu'elle ait suffisamment d'eau disponible ; ce ne fut plus le cas en 2003 où les végétaux ont rejeté plus de CO₂ qu'ils n'en ont absorbé. De la Finlande à l'Espagne, la végétation a été source de carbone pour l'atmosphère pendant plusieurs semaines.

Figure n°6 – Cycle et stock de carbone sur Terre



6.3. LE PROBLEME DE LA COUCHE D'OZONE

La destruction de la couche d'ozone est due à la production de CFC et d'halons, gaz d'origine industrielle. Le protocole de Montréal de 1987 a été signé par 24 pays pour diminuer la production de ces gaz. La réduction de l'ozone induit un refroidissement de la stratosphère mais l'augmentation des principaux gaz à l'effet de serre CO₂, CH₄ et H₂O renforcent le phénomène.

Même en arrêtant la production de CFC, l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre devrait retarder la disparition progressive du trou d'ozone.

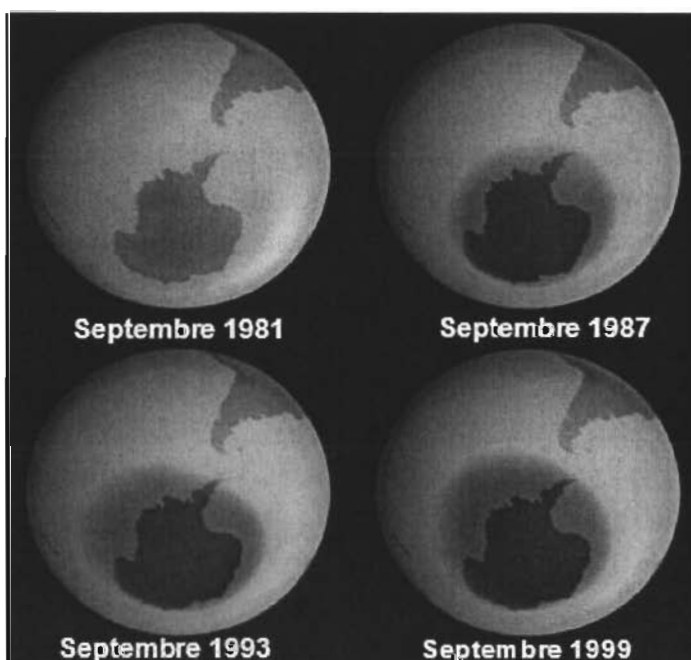


Figure n°7 – Ces images montrent la progression du trou de la couche d’ozone entre 1981 et 1999 (en bleu). Elles ont été prises par un instrument de la NASA nommé Toms, qui équipe de nombreux satellites. Situé au dessus de l’Antarctique, ce « trou » a atteint 10,5 millions de km² en septembre 1998. Depuis on a réagi : gaz CFC sont interdits et les scientifiques espèrent une disparition de ce trou d’ici 2050.

7. CONCLUSION ET L’ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES D’APRES L’ACADEMIE DE L’AGRICULTURE DE FRANCE

Conclusion: Nous concluons en citant le récent communiqué des Académies des Sciences des principaux pays du globe : « ...la compréhension scientifique du changement climatique est à présent suffisamment claire pour justifier que les nations agissent rapidement. Il est vital que toutes les nations identifient des mesures efficaces sur le plan du coût, qu’elles peuvent prendre maintenant, pour contribuer à une réduction substantielle et durable des émissions globales des gaz à effet de serre... ».

Un projet semble actuellement émerger. Baptisé la théorie des « coins de stabilisation », il suscite même l’intérêt des milieux industriels. L’idée ? 15 mesures dont chacune permettrait de réduire de 1Gt les émissions de carbone attendues en 2055 (1 coin=une activité réduisant les émissions qui commencent à 0 Gt aujourd’hui et s’accroît pendant 50 ans, jusqu’à représenter une économie de 1 Gt de carbone pour l’année 2055). Il suffirait que 7 de ces 125 mesures soient mises en place pour ramener les rejets de carbone à leur niveau de 2005, tandis que gagner plus de 7 coins permettrait de les abaisser. Un exemple, le coin du nucléaire : il s’agit de remplacer la puissance de 700 GWatts des centrales au charbon par du nucléaire très peu émetteur.

L’état actuel des connaissances scientifiques d’après l’academie de l’agriculture de France : Un changement climatique peut être dû à des facteurs astronomiques, géologiques et anthropiques.

L’augmentation de la concentration des gaz à effet de serre conduit à un réchauffement et à un certain nombre d’autres conséquences qui inquiètent notre société: remontée du niveau de la mer due à la fonte des glaces ou à la dilatation des eaux océaniques, changement des ressources en eau, variation d’évènements extrêmes (intensité ou fréquence).

Ces conséquences ont provoqué une mobilisation de la société pour ralentir les émissions de gaz à effet de serre, ce qui génère des contraintes plus ou moins acceptées.

Pour quantifier les effets de l'augmentation des gaz à effet de serre, prenons pour référence un doublement du gaz carbonique dans l'atmosphère.

Les scientifiques évaluent de manière assez précise que la diminution du refroidissement radiatif (compte tenu des instabilités convectives de l'atmosphère) est de 2 W m^{-2} à la surface de la Terre et de 4 W m^{-2} au sommet de la troposphère.

Les scientifiques savent aussi que cette perturbation de rayonnement réchauffe la surface de $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, environ.

S'il n'y avait pas de mécanismes pour amplifier cette variation, on pourrait conclure qu'elle a peu de conséquences sur le climat car les fluctuations naturelles de température, bien connues, sont de l'ordre de $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Lors du réchauffement, la vapeur d'eau de l'air augmente et amplifie la perturbation d'un facteur 1,7.

Mais d'autres mécanismes peuvent jouer sur cet effet dont la quantification est plus imprécise, et le rôle des nuages est celui qui pose le plus de problèmes.

Les études sur les observations des différents types de nuages font des progrès importants à l'heure actuelle mais ne permettent pas encore de préciser une valeur de la rétroaction sur le climat global.

Seuls les « Modèles de circulation générale » permettent de déterminer l'effet global, et, à l'heure actuelle, c'est essentiellement cet effet qui élargit la fourchette de réchauffement que calculent ces modèles (de $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ environ).

Les observations de température ont montré, sur les 30 dernières années, une augmentation de l'ordre de $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, et ce résultat a confirmé les études théoriques ou basées sur les modèles plus ou moins sophistiqués.

Les observations précisent que le réchauffement de la surface est accompagné d'un refroidissement de la stratosphère. Cet effet est en accord avec les modèles et s'explique par un mécanisme physique que l'on domine parfaitement.

Insistons sur le fait que l'augmentation de température, bien que faible, a été observée depuis 30 ans sur suffisamment de régions de la planète pour qu'elle renvoie à une réalité, liée à un phénomène global.

Néanmoins, il nous paraît moins important de déterminer une variation globale de température avec une excellente précision que de préciser où se font les plus fortes variations de température et surtout, si les modifications du climat se

feront sur des régions vulnérables, et pour cela l'apport des « Modèles de circulation générale » est irremplaçable.

Les études avec « Modèles de circulation générale » permettent aussi de déterminer les variations de précipitations induites par les changements de circulation atmosphérique.

Comme le mécanisme prépondérant qui provoque les précipitations est de méso échelle (du km à la dizaine de km), mais que la distribution des précipitations calculée par les « Modèles de circulation générale » est à grande échelle (le millier de km), la forte variabilité spatiale des pluies reste imparfaitement décrite.

Néanmoins, les résultats indiquent des valeurs « moyennes » des variations de la pluie sur les grandes zones définies par la circulation générale de l'atmosphère et leur observation en différentes régions semble confirmer certains résultats de modèles.

Une autre conséquence du réchauffement climatique, souvent évoquée par les scientifiques, est l'élévation du niveau de la mer. Ce niveau, mesuré d'abord par un système de bouées, a été depuis 1992 évalué par satellite: les missions Topex - Poséidon et Jason ont conclu à une augmentation d'environ 3 mm an⁻¹.

Le changement du niveau de la mer peut être dû à 2 causes : la variation de la densité de l'eau et du volume de l'eau simplement par dilatation thermique (c'est l'effet stérique), mais bien sûr par celle de la masse d'eau qui serait due à des échanges entre les autres réservoirs des continents et l'océan. La contribution prépondérante durant la décennie 1992-2002 était l'effet stérique, mais depuis quelques années, il semble que la fonte des glaciers se soit accélérée.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre aura des conséquences sur le climat. Ce qui est incertain, en plus de la valeur précise du réchauffement global, ce sont les conséquences sur le climat régional.

Les scientifiques développent des outils et des méthodes pour passer de l'échelle des « Modèles de circulation générale » à une échelle plus fine pour pouvoir déterminer les changements de risques tels que sécheresse, tempêtes, pouvant engendrer des catastrophes humaines, et démêler les causes, dans les variations observées, qui peuvent être liées à d'autres mécanismes.

8. CRITIQUES DU GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAUX SUR LE CLIMAT - GIEC

Il y a deux formes d'écologie: d'un côté, l'écologie humaine et enracinée qui s'intéresse au rapport de proximité de l'homme et de la nature; de l'autre côté, l'écologie planétaire abstraite et globalisante. Les chevaliers de l'apocalypse climatique sont au service de la seconde. Mais ont-ils raison ?

Certes la température en Europe a augmenté de près d'un degré depuis 1870. Mais cet écart de température est inférieur à celui observé lors de l'optimum médiéval (+2 °C) et lors du petit âge glaciaire (-2 °C). Mais les « réchauffistes » ont gommé cette réalité en présentant une courbe (fausse) des températures en « crosse de hockey » dans le but d'affoler les populations.

Certes, il y a une relation entre la température de la terre et le volume de gaz carbonique (l'un des gaz, mais non le plus important, à effet de serre) dans l'atmosphère. Mais les statistiques sur 400.000 ans semblent montrer que c'est la hausse des températures qui précède la hausse de la volumétrie du gaz carbonique et non l'inverse.

Certes les rejets du pétrole augmentent la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère mais la moitié déjà du pétrole disponible sous terre a été consommée. Ce qui limitera forcément la poursuite du phénomène à l'avenir.

Certes les modèles numériques prévoient une hausse importante des températures pour la fin du siècle mais les modèles ne trouvent in fine que ce que leurs concepteurs y ont mis... *ab initio*.

Certes la température mondiale (si tant est que ce concept soit statistiquement valable) semble avoir augmenté au cours du siècle. Mais en quoi est ce catastrophique ? Personne ne se plaint que la moyenne des températures à Marseille soit supérieure de 4 °C à celle de Paris.

Voilà quelques observations simples qui devraient conduire à la climatoprudence.

Jean Jouzel, aujourd'hui âgé de 63 ans, diplômé de l'Ecole Supérieure de Chimie Industrielle de Lyon, deviendrait célèbre à 55 ans, recevant, avec Claude Lorius, la Médaille d'Or du CNRS, et, partageant, la même année 2002, le Prix Nobel de la Paix avec Al Gore et les membres du GIEC [Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur le Climat]. Ses travaux de jeunesse avaient porté sur les grêlons, avant qu'il ne s'oriente vers la géochimie des glaces. Jeune ingénieur de recherche au CEA de Saclay il passa des années à mesurer la composition isotopique de l'eau sous diverses formes naturelles. Sa contribution scientifique essentielle sera plus tardive et reposera sur la construction de modèles corrélant les températures aux proportions d'hydrogène et de

deutérium, d'une part, et d'oxygène 16 et oxygène 18, d'autre part, présents au sein des neiges et des glaces.

Alors que Jean Jouzel est un administrateur et un homme de laboratoire, son maître à penser, Claude Lorius, âgé à ce jour de 78 ans et membre de l'Académie des Sciences depuis 1995, est, quant à lui, un véritable aventurier scientifique. Attiré par l'inconnu, Claude Lorius explora, à partir de 1959, les étendues désertes de l'Antarctique. Il eut l'idée originale de recueillir des carottes glaciaires profondes, de 1975 à 1990, à la station climatique Vostok, l'un des lieux les plus froids et inhospitaliers de la planète (avec un minimum enregistré de -89°C).

A partir de tels échantillons, Claude Lorius en premier, et Jean Jouzel en second, ont comparé les analyses de leurs carottes de glace avec ce que l'on savait du climat passé. Ils sont ainsi arrivés à remonter dans le temps à près de 420.000 ans avant notre ère. Leurs résultats ont fait apparaître des corrélations entre les variations estimées de la teneur en CO_2 de l'atmosphère, avec les températures reconstruites à partir de leurs modèles. Lorsque la température augmente, il en serait de même du CO_2 et vice versa.

Jusque-là, je n'ai à leur faire que des compliments. Ces scientifiques véritables ont réalisé de remarquables et innovants travaux de recherche, introduisant des techniques nouvelles pour analyser des phénomènes encore très mal connus.

A partir de tels échantillons, Claude Lorius en premier, et Jean Jouzel en second, ont comparé les analyses de leurs carottes de glace avec ce que l'on savait du climat passé. Ils sont ainsi arrivés à remonter dans le temps à près de 420.000 ans avant notre ère. Leurs résultats ont fait apparaître des corrélations entre les variations estimées de la teneur en CO_2 de l'atmosphère, avec les températures reconstruites à partir de leurs modèles. Lorsque la température augmente, il en serait de même du CO_2 et vice versa.

Jusque-là, je n'ai à leur faire que des compliments. Ces scientifiques véritables ont réalisé de remarquables et innovants travaux de recherche, introduisant des techniques nouvelles pour analyser des phénomènes encore très mal connus.

En fait, le bilan des reconstructions de chroniques passées que Jean Jouzel et son équipe réalisent dès 1987, à partir de leurs modèles, font apparaître des teneurs atmosphériques de CO_2 et de méthane (CH_4) dans l'atmosphère qui leur paraissent anormalement élevées au cours du dernier siècle. C'est à ce moment-là que tout bascule. A partir de 1990, Jean Jouzel, Claude Lorius, et avec eux, tout un groupe de scientifiques mus par le virus de l'écologie mondialiste, se lancent à l'assaut des médias et de la politique pour attirer l'attention de tous sur ce qu'ils croient pouvoir déduire de leurs observations. Ils prédisent alors une évolution apocalyptique des températures, menant au chaos et à la destruction planétaire, le tout étant assorti d'une élévation considérable du niveau des océans.

Il n'y a, en effet, qu'un pas à faire pour imaginer que, si par le passé le CO₂ a eu des variations parallèles à celles des températures, une forte augmentation du CO₂ devrait, ipso facto, entraîner une forte élévation de la température du globe, cette dernière devant logiquement être suivie par une considérable élévation du niveau des mers.

Il est inutile que j'en dise davantage, car ces thèses ont fait l'objet d'un matraquage médiatique permanent, au point d'être amplement reprises par le monde politique, avec l'installation d'un marché de droits d'émission de CO₂, devenu, pour certains, un élément clef du partage de richesses entre pays pauvres et pays riches.

Chacun sait que l'enfer est pavé de bonnes intentions. Je ne ferai pas procès, ni à Jean Jouzel, ni à Claude Lorius, d'être sortis de leurs laboratoires pour faire de l'activisme écolo-politique. C'est, certainement, animés par les meilleurs sentiments, que ces savants sont devenus, un peu comme l'était en 1816 l'abbé Grégoire, des militants actifs d'une sorte de « république des savants ». Je citerai quelques uns des propos de Claude Lorius, qui déclare, en 2002: « Le savoir devra fonder une action arbitrant des approches écologiques, économiques, sociales et internationales divergentes » et « Il faut maintenir la pression pour que soient développées de nouvelles technologies et que changent les mentalités ». Nous sommes, à ce point, très éloignés des carottes glaciaires et de la composition isotopique des glaces.

La mécanique de cette gigantesque opération médiatique a consisté à faire croire que le monde courrait vers la catastrophe, à cause du prétendu « changement climatique ». Selon Jean Jouzel et Nicolas Hulot, il fallait donc agir d'urgence pour empêcher cette évolution, en adoptant, notamment, des objectifs contraignants d'émission du CO₂, ceci devant, dans l'esprit de ces messieurs, contribuer à réduire drastiquement l'élévation des températures prévue au cours des prochaines décennies.

Le gros problème de ce montage est qu'il repose sur ce que les climatologues ont cru pouvoir déduire de leurs modèles, au vu de leurs connaissances acquises de 1980 à 2000. Or, de nombreuses raisons permettent d'avoir des doutes sérieux sur la véracité de leurs hypothèses, comme de leurs conclusions.

Je commencerai par le caractère causal du CO₂ sur l'élévation des températures. Il est indéniable que les deux facteurs sont liés, mais quelles peuvent être leurs relations de causalité lorsque les variations marquées du CO₂ suivent de 800 ans celles de la température ? Ce décalage ne pouvait être observé par les premières mesures glaciaires de Jean Jouzel et Claude Lorius, puisque leur datation était encore insuffisamment précise pour le faire apparaître. Or, ce qui paraîtrait naturel chez des scientifiques sérieux serait de revenir sur leurs déclarations initiales pour tenir compte des nouvelles informations.

Au lieu de cela, ils pratiquent une fuite en avant constante. Il est clair que s'il s'avérait, *in fine*, qu'une grande partie du battage médiatique sur le climat était infondée, les thuriféraires de l'Apocalypse climatique en seraient, certainement, bien embarrassés. Le rapport récent de l'Académie des sciences sur le climat est très précis à ce sujet; il dit : « l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, dont une large part est d'origine anthropique, joue un rôle essentiel dans ... l'augmentation du réchauffement climatique de 1975 à 2003 ». Or, le CO₂ n'est qu'un gaz à effet de serre parmi beaucoup d'autres. Outre le méthane (CH₄), un autre composant de l'atmosphère joue un rôle majeur. Il s'agit de la vapeur d'eau, dont l'effet de serre serait de l'ordre de 500 fois plus important que celui du CO₂. L'Académie des sciences ne dit aucunement que le CO₂ est le facteur principal du changement climatique. Bien au contraire, elle évalue son impact éventuel à un effet relatif très faible (de l'ordre de 1,1 °C pour un doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère). Ce rapport insiste aussi sur les « incertitudes importantes » qui demeurent sur l'analyse du climat, et qui affectent notamment la crédibilité des prévisions à long terme.

En bref, la situation est beaucoup moins claire qu'on ne voudrait nous le faire croire, et les diverses prédictions catastrophiques qu'on a présentées de ci, de là, et principalement au sein du GIEC, dont Jean Jouzel est, rappelons-le, une figure majeure, sont de plus en plus mises en défaut. Le rapport récent de l'Académie des sciences, en accord avec un texte analogue de la Royal Society, évalue l'augmentation moyenne des températures à 0,8°C de 1870 à 2010, alors qu'un doublement de la teneur en CO₂ de l'atmosphère ne pourrait aboutir qu'à une élévation moyenne des températures voisine de 1,1 °C. Or la teneur atmosphérique du CO₂ est actuellement de 0,0388%, dont 50% serait dû à des causes naturelles, alors qu'elle s'élevait à 0,0280% en 1870. Comme il semble qu'on ait déjà exploité de l'ordre de la moitié des réserves connues de pétrole, on imagine mal un bouleversement profond du climat dans le siècle à venir, puisqu'il serait quasiment impossible de brûler assez de combustibles fossiles pour élever rapidement la proportion de CO₂ au double de 0,0388%.

Le plus troublant est que les reconstructions de températures telles qu'elles découlent des travaux de Jean Jouzel et de ses co-auteurs ne font pas apparaître clairement les évolutions climatiques observées au cours des derniers millénaires. L'ordre de grandeur des variations de température observés durant la période de l'« optimum médiéval » (vers 1.100) et du « petit âge glaciaire » (vers 1750) seraient voisins de +2 °C et -2 °C, respectivement, par rapport à aujourd'hui. Comment expliquer de telles variations, alors que le CO₂ d'origine industriel n'était quasiment pas présent à ces époques ? C'est une question importante qui est systématiquement éludée par les rapports récents du GIEC, comme par Jean Jouzel. Signalons que ces chiffres, donnés par le GIEC en 1997, sont cohérents avec l'histoire. Faut-il rappeler la victoire du général Pichegru sur la flotte hollandaise en 1795 par une charge de cavalerie sur la mer gelée ? Se

souviendra-t-on que la vigne était cultivée au Moyen-âge jusqu'en Norvège ? Enfin, les travaux récents des glaciologues suisses montrent qu'à l'époque romaine les glaciers des Alpes étaient réduits à leur plus simple expression, avec une limite inférieure des neiges se trouvant à plus de 300 mètres plus haut que celle d'aujourd'hui. Or, les reconstructions de températures issues des travaux de M. Jouzel réduisent les variations de températures correspondantes à un ordre de grandeur de + ou - 0.2 °C. Ce n'est pas crédible ! L'excellent livre de Benoît Rittaud, *Le Mythe Climatique* (Le Seuil, 2010), décortique les manipulations statistiques qui ont donné lieu à la fameuse courbe en « crosse de hockey », présentée par le GIEC comme une démonstration de l'imminence de la catastrophe qui attend l'humanité. Pour mémoire, cette courbe présentait faussement une quasi-constance des grands paramètres climatiques (température, CO₂,...) durant les deux derniers millénaires, suivie par une augmentation massive de ces derniers au cours du dernier siècle.

La thèse du GIEC et de Jean Jouzel affirme haut et fort que le changement climatique actuel est « sans précédent » et « irréversible ». Tout ceci ne résiste pas à l'analyse.

Sur le fond, j'observe que si les modèles sur lesquels s'appuient M. Jouzel et ses co-auteurs pour reconstruire les températures au cours des derniers millénaires « gommant » les variations connues (très positives au Moyen Age et à la période romaine, et très négatives durant le « petit âge glaciaire »), c'est qu'ils doivent être structurellement entachés d'erreur. A l'inverse de ces derniers, les mesures par dendrochronologie (mesures de la croissance des arbres), ou par le carottage de glaces de glaciers canadiens, ont bien mis en évidence des variations de + ou - 2 °C. Alors, qui a raison ? Au lieu de procéder à une révision de ses modèles par leur confrontation avec des faits avérés, Jean Jouzel s'installe dans un véritable déni de la réalité. Venons-en à l'extraordinaire prévision par le GIEC de la fonte des glaciers de l'Himalaya en 2035.

Jean Jouzel balaie d'un tour de main toutes les critiques qui lui sont faites sur ce point précis, alors même qu'il est glaciologue, au point que le journaliste Sylvestre Huet, pourtant acquis à la plupart de ses thèses, en vient à lui dire « Vous avez toujours raison, alors ? ».

Je crois que ce cri du cœur résume l'essentiel. Il ne suffit pas d'avoir publié article sur article, d'avoir accumulé les récompenses, ni même d'avoir obtenu le Prix Nobel, pour devenir infaillible. Jean Jouzel se trompe lorsqu'il refuse de revenir sur celles de ses affirmations passées qui sont infirmées par les faits. Il nous trompe, lorsqu'il présente comme un dogme absolu l'idée que la réduction de nos émissions de CO₂ fera baisser la température autrement qu'à la marge. Pis encore, il agit comme un apprenti sorcier. Nul homme sensé ne souhaiterait que les températures de la planète reviennent au niveau des terribles hivers de la fin du 18ème siècle. Or, si on adoptait complètement les thèses du GIEC, ce serait la perspective idéale vers laquelle voudraient nous orienter les tenants de

la réduction de gaz à effet de serre. On meurt beaucoup plus facilement de froid que de chaud, et la constatation que les périodes historiques où la Terre avait des températures moyennes de l'ordre de 2 °C supérieures à la température actuelle ont coïncidé avec une grande prospérité devrait faire réfléchir. Au fond, le réchauffement climatique est-il bon ou mauvais ? Pour Jean Jouzel, la question ne se pose même pas.

Pour conclure, un certain nombre de scientifiques ont propagé des idées fausses sur de simples bases idéologiques. Heureusement, dans nombre de cas, leurs erreurs n'auront pas eu d'impact. Pour ce qui est de Jean Jouzel et du GIEC, force est de constater que la catastrophe n'est pas celle du climat.

Notons, au passage que la différence des températures moyennes entre Paris et Marseille est de plus de 4 °C (15°9 à Marseille et 11°1 à Paris). Alors, si la température parisienne augmentait de 1,1 °C à la suite du doublement de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, ce ne serait, sans doute pas, une grande catastrophe non plus.

9. DOMAINE D'ETUDE DE LA BIOCLIMATOLOGIE

Les conceptions actuelles de ce cycle de l'eau reposent sur l'appréciation du fait que le champ (ou la station) et ses composantes – le sol, la plante, l'atmosphère – constituent une entité physique dynamique dans laquelle les processus de circulation de l'eau sont interdépendants comme les maillons d'une chaîne.

Dans ce système unifié appelé SPAC (Sol – Plante – Atmosphère – Continuum) par Philip (1966)¹, la circulation de l'eau se fait d'un niveau d'énergie potentielle élevé vers un autre moins élevé, si on admet que le concept de « potentiel de l'eau » est applicable au sol, à la plante et à l'atmosphère.

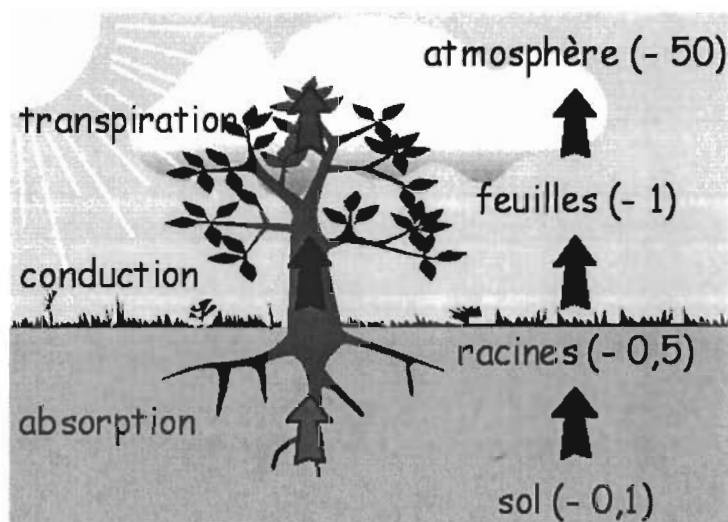


Figure 5 – Système unifié appelé « Sol – Plante – Atmosphère – Continuum », la circulation de l'eau se fait d'un niveau d'énergie potentielle élevé ($\Psi_{\text{sol}} = -0,1$ bars) vers un autre moins élevé ($\Psi_{\text{atmosphère}} = -50$ bars).

Ainsi, la circulation de l'eau comprend le mouvement de l'eau du sol vers les racines, l'absorption par les racines, le transport des racines vers les branches et à travers le xylème jusqu'aux feuilles, l'évaporation dans les cavités intercellulaires des feuilles, la diffusion de la vapeur d'eau à travers les stomates vers la couche d'air calme au niveau de la feuille et à travers la couche d'air turbulente à partir de laquelle la vapeur d'eau diffuse dans l'atmosphère extérieure.

La bioclimatologie se situe donc au carrefour de plusieurs disciplines: la physique de l'eau du sol (étude du sous-système « Sol »), l'écophysiologie végétale (sous-système « Plante »), la micro météorologie (sous-système « Atmosphère ») et la climatologie.

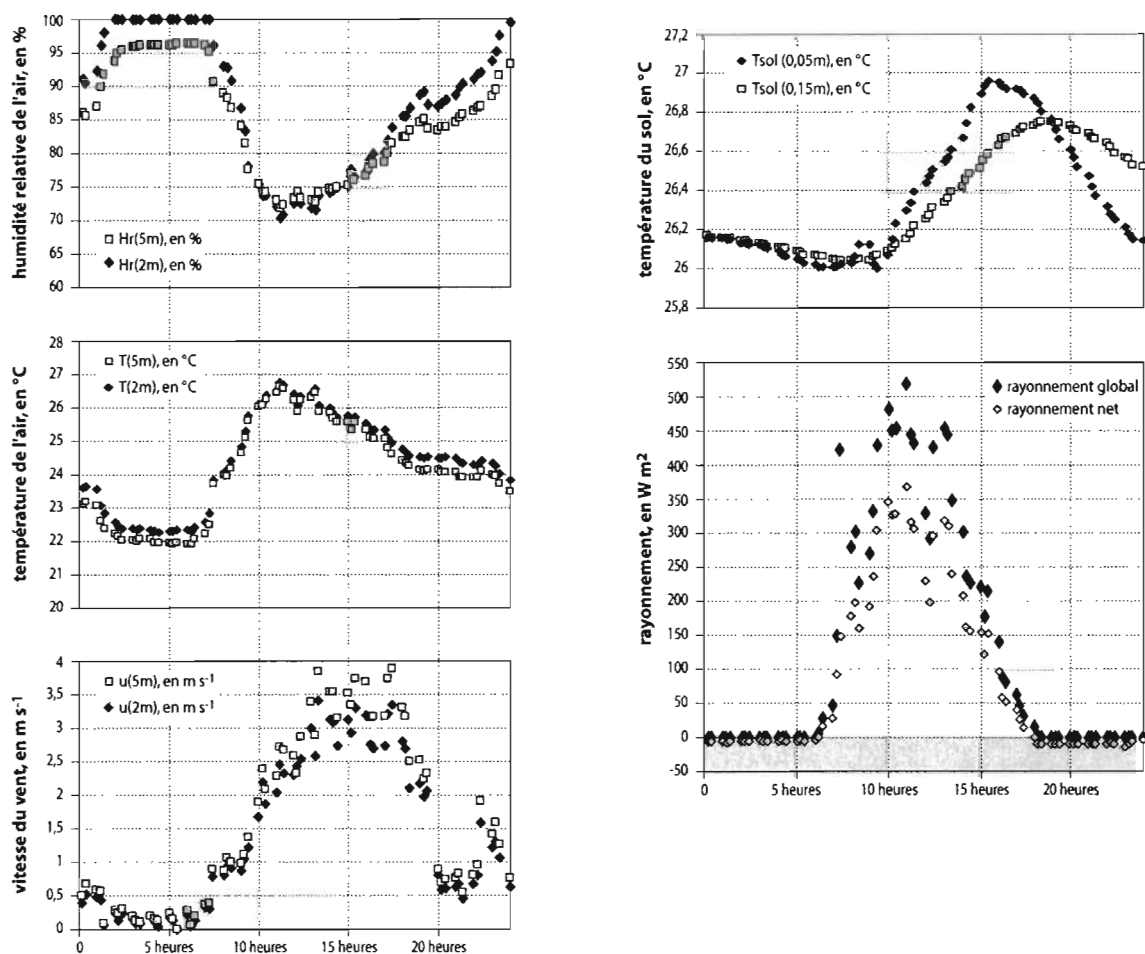
Cette dernière utilise les données bio-climatologiques dans l'étude et dans la modélisation de la circulation générale de l'atmosphère. L'atmosphère est l'un

¹ Philip J.R., 1966. Plant water relations: some physical aspects. Annual Review of Plant Physiology, 28, 71-88

des systèmes étudiés par la climatologie, avec les trois autres systèmes que sont les océans, les continents et la cryosphère.

C'est sur les continents, à proximité de la surface du sol, qu'ont lieu des phénomènes essentiels dans le déterminisme du climat (rayonnement, évapotranspiration). Les continents sont le siège de phénomènes de transfert de masse (vapeur d'eau) et d'énergie (chaleur latente d'évaporation) qui sont objets d'étude de la bioclimatologie. La micro-météorologie établit, entre autres objets d'étude, les profils verticaux des caractéristiques de l'état de l'atmosphère (température, humidité de l'air, vent...) dans la couche limite de surface (de 0 à 30 m au dessus du sol); c'est dans cette couche que la variabilité (dans l'espace et dans le temps) de ces caractéristiques est la plus prononcée.

Figure n°6 – Evolution au cours de la journée du 29 septembre 1998 (a) de la température moyenne de l'air (T_{air}), de l'humidité relative de l'air (Hr), de la vitesse du vent (u) à 2,0 et 5,0 m au-dessus de la surface du sol de la savane ; (b) de la température du sol à 0,05 et 0,15 m de profondeur, du rayonnement global (R_g) et rayonnement net (R_n) à 6,0 m au dessus de la surface du sol de la savane (Nizinski et al. 2011²).



² Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2011. Actual evapotranspiration and canopy resistance measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). Arid Ecosystems - Aridnye Ekosistemy

L'étude des phénomènes physiques qui interviennent dans les trois sous systèmes (sol – plante - atmosphère) et qui se déroulent simultanément à des « régimes différents » pose le problème des différentes échelles d'espace et de temps en bioclimatologie: il convient de distinguer l'échelle phénoménologique (les processus réels) et les échelles imposées par les méthodes de mesure et par la modélisation.

Les phénomènes étudiés le sont du niveau de la feuille à celui de l'individu, de l'ensemble des individus d'un peuplement jusqu'à l'échelle régionale. Les échelles de temps des phénomènes mesurés vont de la seconde (bilan énergétique) à quelques jours (modification de l'indice foliaire) à la semaine ou plus (teneur en eau du sol, absorption racinaire).

Une autre caractéristique qui se rencontre dans tout essai de compréhension mécaniste d'un système complexe est le fait que l'on ne dispose pas encore de méthode expérimentale pour appréhender certains phénomènes, ainsi la mesure des gradients et flux microscopiques de l'eau au voisinage immédiat des racines (les méthodes de mesure de la teneur en eau du sol et du potentiel hydrique du sol reposent sur la détection d'un volume de sol relativement grand qui englobe ces micro-gradients).

Nous abordons les grandes problématiques de cette discipline:

- le déterminisme du flux d'eau dans le système SPAC, les systèmes de régulation de ce flux (modèles phénologiques, modèles de régulation stomatique, d'absorption racinaire).
- l'incidence de la modification des couverts sur l'évapotranspiration (déboisement et reboisement) et sur le climat régional.
- l'impact de la contrainte climatique (hydrique et énergétique) sur la production végétale.

Pour illustrer nos propos, nous vous proposons les résultats obtenus dans des écosystèmes de physionomie différentes: des couverts fermés herbacés (savane), des couverts fermés arborescents (forêts), des couverts fermés non homogènes (savane arbustive avec zone herbacée et bosquets arbustifs et arborescents disséminés) assimilés actuellement, pour la modélisation, à une végétation éparse (recouvrement du sol par la végétation non complet).

Nous avons travaillé dans des climats différents: la zone tempérée (forêt de chênes), la zone tropicale humide (forêt tropicale humide en Guyane française; plantations d'*Eucalyptus* et savane au Congo; plantations d'hévéas au Ghana et en Côte d'Ivoire) et la zone subtropicale sèche (savane boisée du nord du Sénégal).

Nous aborderons le cycle de l'eau à l'échelle régionale, problématique qui débouche sur les études des changements globaux.

10. CARTOGRAPHIER LA PRODUCTION VEGETALE

Des cartes de biomasse totale ont été réalisées à partir de mesures au sol prises en divers points du globe. Ces mesures ne sont pas parfaites et ont été relevées à des dates variées, souvent il y a plus de vingt ans, mais elles sont les seules actuellement disponibles. Dans l'avenir, on peut espérer obtenir des cartes de biomasse à partir de mesures satellitaires à l'aide de radars.

En effet, lorsqu'on envoie vers les surfaces naturelles un rayonnement radio de courte longueur d'onde (comprises entre 10 et 60 cm), celles-ci renvoient un rayonnement rétro diffusé qui dépend de la biomasse végétale. Les essais effectués par avion sur des forêts indiquent une réponse proportionnelle à la biomasse jusque vers 130 tonnes par hectare, chiffre proche de la biomasse moyenne des forêts du monde, mais évidemment bien inférieur à la biomasse de certaines forêts âgées. Pour rendre cette méthode opérationnelle, il faudrait disposer d'un satellite équipé d'un capteur adéquat, ce qui n'est pas encore le cas.

La biomasse foliaire a été calculée à partir de l'indice de végétation mesuré par satellite, et celle des racines fines a été estimée égale à la biomasse foliaire ; on considère que la part de biomasse qui n'est ni feuille ni racines fines est du bois. Comme seule la partie externe du tronc d'un arbre est vivante et respire, il a fallu calculer la fraction de bois vivant, qui diminue lorsque la biomasse augmente. Pour évaluer la dépendance de la respiration vis-à-vis de la température, une relation linéaire a été utilisée; elle semble bien traduire les variations observées en fonction de la latitude.

Bien que cette procédure puisse paraître compliquée, elle est extrêmement simplifiée par rapport aux processus réels intervenant dans la nature. Son avantage est de permettre une estimation de la production végétale à partir de mesures satellitaires : toute augmentation de couverture végétale sera immédiatement perçue par le satellite et répercutée en une augmentation de production.

Calculs de productivité par satellites d'après Ruimy *et al.*, 1996³:

- la production primaire brute (PPB) est proportionnelle au rayonnement solaire absorbé par la végétation ;

³ Ruimy *et al.*, 1996

- la respiration autotrophe (R_a) est liée à la biomasse et à la température; elle est forte pour les forêts équatoriales ;
- La productivité primaire nette (PPN) est obtenue par la différence $PPB - R_a$

Cartes de photosynthèse, de respiration des plantes et, par différence, de production nette. La carte de photosynthèse reproduit celle du rayonnement absorbé par le feuillage, donnant des valeurs élevées dans la zone équatoriale où l'on a des rayonnements incidents élevés (malgré un couvert nuageux important) et un recouvrement végétal maximale toute année. La carte de respiration des plantes donne les valeurs les plus fortes pour les forêts équatoriales qui conjuguent fortes biomasses et températures élevées. Enfin, la carte de production nette combine les données précédentes et ressemble qualitativement à la première carte. Les valeurs globales sont respectivement de 133 Giga tonne de Carbone par an pour la photosynthèse (encore appelée production brute), de 71 Giga tonne de Carbone par an pour la respiration laquelle représente donc en moyenne 53 % de la photosynthèse, laissant 62 Giga tonne de Carbone par an pour la production nette. Il est clair que ces valeurs sont encore préliminaires et pourront évoluer sensiblement avec l'amélioration des mesures et de la paramétrisation.

L'approche satellitaire permet de décrire l'état actuel de la photosynthèse et de la respiration, mais non pas son évolution future puisqu'elle dépend des observations. On peut utiliser pour cela des modèles utilisant comme entrées les seules variables climatiques et la teneur en dioxyde de carbone de l'air, qui pourront être fournis par des sorties de modèles climatiques utilisant des scénarios réalistes d'évolution des émissions de gaz à effet de serre. On peut même coupler les modèles de production aux modèles climatiques comme cela commence à se faire. Ces modèles de production doivent représenter les connaissances de façon réaliste que possible.

On s'aperçoit à cette occasion que nos connaissances n'en sont pas au même stade suivant les domaines. On sait, par exemple, assez bien rendre compte de la photosynthèse d'un couvert végétal en fonction des conditions climatiques si on connaît son indice foliaire. La respiration des plantes est un peu moins bien connue, mais on y parvient également.

Celle des décomposeurs du sol pose quelques problèmes. En effet, dans les modèles actuels, elle dépend seulement de la température et de l'humidité du sol, qui doit donc aussi être calculée à l'aide **d'un modèle de bilan hydrique**.

Mais la principale difficulté consiste à simuler correctement l'indice foliaire (ou le recouvrement végétal) et ses variations saisonnières, car tout le reste en dépend. Le problème est déjà difficile pour une culture annuelle comme le blé. Il l'est beaucoup plus encore pour les nombreux biomes « naturels ». Une solution

adoptée dans certains modèles consiste à optimiser la production végétale : la végétation ne met en place de feuillage que lorsque les conditions climatiques (température, alimentation en eau) permettent de dégager un bilan carboné positif entre la photosynthèse et la respiration. Cela permet de reproduire une dormance lorsque le temps est trop froid ou trop sec. De plus, l'indice foliaire maximal atteint en période de végétation est déterminé par le bilan hydrique du sol : s'il est trop fort, la réserve en eau du sol ne peut pas être rechargée par les précipitations au cours d'un cycle annuel, s'il est trop faible, une partie de l'eau du sol ne sera pas consommée. Le modèle détermine alors l'indice foliaire maximal compatible avec le régime hydrique du lieu.

Ces hypothèses d'optimisation sont intéressantes, mais restent en partie théorique: dans la réalité, les plantes ont souvent développé plusieurs stratégies complémentaires. Ainsi, dans les déserts, on trouve des plantes annuelles qui germent et poussent seulement lorsque les pluies sont suffisantes; on trouve aussi des plantes à feuillage permanent dont les stomates restent fermés tant que dure la sécheresse. Il faudra donc dans l'avenir développer des modèles plus réalistes représentant ces divers groupes fonctionnels de plantes. Ces modèles existent déjà à l'échelle locale, mais leur extension à l'échelle globale paraît actuellement peu réaliste.

D'autre part, il ne faut pas oublier le rôle direct du dioxyde de carbone (en interaction avec la température) sur la photosynthèse et la production de biomasse. Son rôle à long terme est-il le même qu'à court terme ? Les arbres, s'ils poussent plus vite, vont-ils atteindre plus rapidement la même taille qu'aujourd'hui ou bien des tailles plus grandes ?

11. CLIMATS, FORMATIONS VEGETALES ET ENVIRONNEMENT PHYSIQUE

La végétation de la Terre est répartie sur les continents en fonction des climats existants, allant d'une forêt exubérante près de l'équateur à une végétation rase aux hautes latitudes. Quels sont les principaux facteurs climatiques déterminant ces types de végétation ?

Pour assurer leur photosynthèse, les plantes ont besoin de rayonnement solaire, d'eau et d'éléments minéraux. Leur croissance et leur reproduction exigent des températures ni trop basses ni trop élevées.

L'ensoleillement, qui varie avec la latitude et la saison, détermine l'énergie reçue par unité de surface de sol. Cette énergie est maximale entre les tropiques et décroît en allant vers les pôles. De plus, les variations saisonnières d'ensoleillement sont faibles près de l'équateur et augmentent lorsque l'on se

rapproche des pôles; il en va de même pour les variations saisonnières de température.

Par ailleurs, la circulation de l'atmosphère et des océans redistribue vers les pôles le surplus d'énergie absorbée près de l'équateur et détermine des zones de haute pression (plus sèches) et des zones de basse pression (plus humides).

La disponibilité en eau est un facteur clé du climat. Sur l'océan ou dans les zones continentales pluvieuses, l'essentiel du rayonnement solaire absorbé sert à évaporer l'eau disponible, laissant une faible part pour chauffer l'atmosphère. Ces climats présentent donc de faibles variations journalières de température. Au voisinage des océans, les variations de température sont de plus en plus atténuées par la grande capacité thermique de l'eau : c'est le climat océanique. Au contraire, dans les zones sèches des continents, l'essentiel du rayonnement solaire absorbé est utilisé pour chauffer l'atmosphère et on observe de fortes variations de température entre le jour et la nuit: c'est le climat continental, où les contrastes les plus marqués s'observent dans les déserts.

La circulation de l'atmosphère est modifiée par la rotation de la Terre: tout mouvement de l'air est dévié vers sa droite dans l'hémisphère Nord et vers sa gauche dans l'hémisphère Sud. Elle est aussi affectée par le relief, qui modifie températures et précipitations, avec un versant au vent plus humide et un versant sous le vent plus sec.

Ces différents facteurs déterminent les grands types de climat à la surface du globe. Le plus souvent, le climat est caractérisé par les températures et les précipitations. Les moyennes annuelles ne permettent pas de distinguer un climat humide toute l'année d'un climat avec saison sèche marquée; aussi est-il préférable de se référer aux moyennes mensuelles, qui traduisent l'ensemble des facteurs décrit ci-dessus.

Les météorologistes fournissent généralement un climat moyen: la température de juillet, par exemple, est établie comme la moyenne des températures des trente et un jours du mois, elle-même calculée en générale sur une durée de trente ans. Cette méthode ne permet cependant pas de repérer les événements exceptionnels. Ceux-ci jouent sans doute un rôle décisif dans la présence ou l'absence de certaines espèces de plantes et devraient être pris en compte à l'avenir.

Divers systèmes de classification des climats ont été élaborés depuis le XIX^e siècle. Le géographe et météorologue allemand Wladimir Köppen⁴ a ainsi distingué trois grands types de climat d'après les températures : les climats sans hiver des tropiques, avec une moyenne supérieure à 18 °C pour le mois le plus

⁴ Köppen W., 1918. Handbuch der Klimatologie. Hamburg, vol. I-V.

froid, les climats sans été des hautes latitudes, avec une moyenne inférieure à 10 °C pour le mois le plus chaud, et les climats tempérés des latitudes moyennes, intermédiaires entre les deux. Köppen a subdivisé ces climats en tenant compte de la répartition des précipitations au cours de l'année, et y a ajouté un quatrième type, les climats secs, dans lesquels l'évaporation potentielle excède les précipitations pour tous les mois de l'année. Dans ces climats, l'eau n'est jamais en excès et aucune rivière ne prend sa source dans les régions concernées. Les forêts sont exclues des climats sans été et des climats secs.

En se déplaçant vers le nord à partir de l'équateur vers 22° de longitude est, on rencontre successivement la forêt tropicale humide à feuilles persistantes, du bassin du Congo au Zaïre, la forêt sèche à feuilles caduques, la savane, la steppe, le désert, la végétation méditerranéenne, la forêt feuillue, la forêt boréale de conifères (taïga), et enfin la toundra, au nord de la Scandinavie. Arbres et forêts dominaient la végétation du globe avant l'apparition de l'homme, à l'exception des zones trop froides ou trop sèches d'où ils étaient exclus.

La typologie ci-dessus est très sommaire, et l'on distingue selon les auteurs de dix à cent biomes en fonction de la finesse de résolution souhaitée. Les principaux types de végétation sont établis d'après la physionomie: forêts (peuplements denses d'arbres de plus de deux mètres de haut), steppe ou végétation herbacée (plantes de moins de deux mètres de haut) et mélange herbes - arbres de type savane. On doit y ajouter les cultures, qui représentent environ 11 % de la surface totale des continents, et les déserts.

Couverture végétale des continents en pourcentage de la surface totale (149 millions de km²) : forêts - 24,0 % ; prairies et toundra - 14,7 % ; savanes - 15,0 % ; cultures - 11,0 % ; déserts et glaces - 30,5 % ; autres : eau libre, marais, villes - 4,8 %.

Les chiffres fournis sont toutefois à prendre avec précaution car ils varient selon les auteurs : ainsi, les pourcentages de forêts varie de 21 à 43 % et nous avons pris une valeur intermédiaire de 24 %. Il serait souhaitable de pouvoir les remettre à jour périodiquement sur la base des seules données satellitaires présumées objectives et fiables. Cela suppose que les divers biomes puissent être distingué d'après les caractéristiques des rayonnements qu'ils renvoient vers le satellite. On peut utiliser pour cela la variation saisonnière de l'indice de végétation, qui mesure la fraction de sol couverte de feuilles vertes. Cette variation est très différente selon qu'on a affaire à une forêt à feuilles persistantes, à une forêt à feuilles caduques ou à une prairie dont les rythmes de croissance et de sénescence foliaire sont décalés par rapport à ceux de la forêt. Des cartes de ce type sont en cours d'élaboration.

La correspondance entre la répartition de la végétation sur les continents et celle des climats a été remarquée depuis longtemps et les naturalistes ont cherché à quantifier ces relations dès le XIX^e siècle. Divers systèmes de classification des climats ont ainsi vu le jour, comme celui de Köppen, décrit ci-dessus. Celui de Holdridge⁵, établi en 1947, a été largement utilisé pour tenter de prédire les déplacements de la végétation sous l'influence de changements climatiques. Il utilise seulement les moyennes annuelles de température et de précipitations, et définit chaque type de climat par des limites de ces deux variables. Comme la végétation se développe très peu au-dessous de 0 °C, il calcule une bio température qui est la moyenne annuelle des températures mensuelles supérieures à 0 °C, les températures négatives étant considérées égales à 0 °C.

De même, la disponibilité en eau du climat est un facteur important pour la végétation et cette disponibilité dépend non seulement des précipitations, mais aussi de l'évaporation qui augmente avec la température. Pour chaque fourchette de bio température et précipitations, Holdridge définit un climat en relation avec un type de végétation à l'aide de cases dans un diagramme en triangle. Une augmentation de température assez importante entraîne un changement de case et donc de végétation.

Ce système a été appliqué par Colin Prentice⁶, de l'université de Lund en Suède, à la reconstitution de la végétation des époques glaciaires, et comparé à la répartition réelle reconstituée à partir d'analyses de pollen fossile qui s'est conservé dans les zones protégées de l'oxydation, comme les tourbières. Il offre l'avantage de la simplicité, mais ne prend toutefois pas en compte les facteurs non climatiques comme la concentration en dioxyde de carbone. De plus, il ne considère qu'une végétation en équilibre avec le climat, supposé stable sur une période de l'ordre du millénaire, ce qui n'est pas le cas, aujourd'hui moins que jamais. Il faut donc considérer le passage progressif d'un type de végétation à un autre, qui fait intervenir des facteurs biologiques complexes comme la vitesse de migration des espèces. Ces aspects commencent maintenant à être reconnus et pris en compte.

Lorsque la vie est apparue sur la Terre, elle a commencé à modifier le milieu dans lequel elle a pris naissance, prélevant des molécules simples et en rejetant d'autres, plus complexes. Cet effet, d'abord local, s'est progressivement étendu à l'ensemble du globe. Ainsi, l'oxygène de l'air que nous respirons a été produit par la photosynthèse au cours des temps géologiques. Puis, lorsque la vie a envahi les continents, de grands types de végétation se sont constitués, en équilibre avec le climat.

⁵ Holdridge, 1947.

⁶ Colin Prentice

A une échelle plus fine, on remarque en se promenant dans la campagne des éléments de paysage bien marqués: cultures, forêts, mares, prairies. Ces éléments ont une limite relativement nette. L'ensemble des plantes et des animaux qui vivent sur cet élément ainsi que le milieu (air, sol), qui a été modifié par la présence des êtres vivants, constituent un écosystème. Le préfixe éco- vient du grec *oikos*, qui signifie « maison », « habitat ». Le plus grand écosystème connu est la biosphère, qui regroupe l'ensemble des formes de vie sur Terre avec leur habitat : océans, partie superficielle de la Terre solide sur quelques dizaines de mètres de hauteur. La biosphère représente aussi un cas idéal d'écosystème dans la mesure où elle n'échange pratiquement pas de matière avec l'extérieur : on dit que c'est un système fermé pour la matière, mais ouvert pour l'énergie puisqu'elle absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (0,25 à 5 μm) et émet vers l'espace un rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'onde (5 à 100 μm). En pratique, les écosystèmes sont souvent partiellement ouverts, mais leurs échanges internes sont plus importants que leurs échanges avec les autres écosystèmes.

On peut aussi définir l'écosystème comme la plus petite subdivision de la biosphère capable de se suffire à elle-même lorsqu'elle reçoit de l'énergie. Dans la pratique, sauf pour la biosphère, l'autosuffisance est partielle, car les pluies et le dioxyde de carbone que reçoit par exemple une forêt viennent de loin, l'atmosphère ne connaissant pas de frontières. Un écosystème peut être de très petite taille : ainsi, un aquarium bien géré nécessite peu d'apport de nourriture ; les poissons peuvent se nourrir de petits crustacés qui se nourrissent eux-mêmes de plancton.

On distingue trois types principaux d'organismes dans un écosystème:

- A la base se trouvent des producteurs ou autotrophes, capables de se nourrir eux-mêmes par photosynthèse à partir de molécules simples de leur milieu (dioxyde de carbone de l'air, eau et minéraux du sol); ce sont en général des plantes vertes poussant sur les continents.
- Ensuite viennent les consommateurs ou hétérotrophes, mangeant des plantes (herbivores) ou des animaux (carnivores),
- Enfin les décomposeurs, animaux du sol, bactéries et champignons, qui dégradent la matière organique des plantes et animaux morts en éléments minéraux réutilisables par les plantes.

Un écosystème peut se caractériser par sa structure – nombre d'espèces, répartition, biomasse -, et son fonctionnement, c'est-à-dire l'intensité des flux de matière qui le traversent et de ceux échangés avec l'extérieur. Il existe des relations étroites entre structure et fonctionnement, qui dépendent de l'histoire

de l'écosystème et des contraintes exercées par le milieu, telles que les températures extrêmes, la sécheresse, l'acidité ou la salinité des sols, *etc...*

La quantité de biomasse élaborée par un écosystème en un temps donné représente ce que l'on appelle **la production primaire nette**. Une partie de cette production permet l'accroissement de biomasse des plantes (croissance), le reste est consommé par les herbivores ou perdu par mortalité et apporté au sol. Cette production détermine l'intensité de tous les flux d'éléments minéraux circulant dans l'écosystème : carbone, eau, azote... Comme elle est formée par photosynthèse, elle dépend du rayonnement solaire intercepté par la végétation, c'est-à-dire du rayonnement incident et de la fraction de sol couverte par des feuilles vertes.

En France, par exemple, les éléments du paysage sont déterminés essentiellement par les hommes, qui décident de l'utilisation du sol. Mais si ces derniers cessaient soudain d'exercer leur influence, la végétation retournerait progressivement à son état naturel, une forêt feuillue sur presque tout le territoire (*climax*).

On appelle climax l'écosystème en équilibre avec son milieu, sans perturbation par les activités humaines. Cette notion a été suggérée aux biogéographes et écologistes du début du siècle par l'examen des correspondances étroites entre les grands biomes et les types de climat. Ils avaient aussi observé la colonisation de roches nouvellement apparues à la suite d'éruptions volcaniques. Les lichens et les mousses, capables de résister à une forte déshydratation, sont les premiers organismes à apparaître. Ils provoquent une altération des roches qui donne progressivement naissance à un sol, permettant l'apparition de plantes de plus en plus exigeantes en eau et en minéraux : graminées, arbustes, arbres. L'ensemble de ces phénomènes constitue ce que l'on appelle la **dynamique de l'écosystème**. Celui-ci naît, vit et peut mourir ou se modifier fortement en cas de perturbation importante.

Certains ont comparé l'écosystème à un organisme, mais cela n'est qu'une analogie car il ne peut y avoir de reproduction fidèle. En effet, l'écosystème, contrairement à un organisme, ne possède pas de patrimoine héréditaire. Les espèces qui le composent ne sont pas seulement déterminées par les conditions du milieu, mais aussi par le hasard, qui va favoriser la colonisation par les espèces les plus proches.

Le milieu est toutefois assez contraignant pour que l'on puisse déterminer des associations végétales, c'est-à-dire des ensembles d'espèces rassemblées sur le même type d'habitat. La présence de certaines espèces est liée à des conditions précises : on trouve par exemple les saules, les aulnes et les laïches sur des sols humides, les bouleaux et les bruyères sur le sol sableux acide. D'autres espèces

ont une large gamme d'habitats et leur présence ou absence est donc mois significative.

La notion du climax a été contestée car le milieu constant n'existe pas. Des perturbations, qu'elles soient externes (feu, tempête, froid, sécheresse, inondation) ou internes (attaques de parasites, exploitation), se produisent toujours. Même une forêt non exploitée en subit : la mort d'un arbre ouvre une clairière, apportant au sol lumière et chaleur. Ce changement de conditions stimulera d'abord la croissance de plantes de pleine lumière, puis la clairière se refermera progressivement, favorisant des espèces de plus en plus tolérantes à l'ombrage. La forêt naturelle est donc une mosaïque de petits sites à divers stades de régénération. Malgré ces difficultés, nous continuerons à utiliser la notion de climax à l'échelle régionale, car elle permet une bonne caractérisation de la végétation.

Les plantes vertes produisent des sucres [glucides ; $(\text{CH}_2\text{O})_n$] par **photosynthèse** à partir de dioxyde de carbone et d'eau. La masse de glucides produits en un temps donné constitue la **production primaire brute** (PPB). Ces glucides sont ensuite transformés en diverses molécules et incorporés dans les tissus végétaux; une partie des glucides produits par la photosynthèse est consommée par la respiration autotrophe (R_a) pour assurer les besoins énergétiques des tissus non photosynthétiques, et des feuilles pendant la nuit.

La **production primaire nette** (PPN) est la différence entre la production primaire brute et la respiration autotrophe. Elle correspond à la production de biomasse par les plantes et s'exprime par exemple en gramme de matière sèche par mètre carré de sol et par an. On exprime la biomasse végétale en matière sèche car son contenu en eau est élevé (70 à 90 %) et variable selon les conditions d'eau du sol et du climat.

Comme le constituant essentiel de la biomasse est le carbone, on l'exprime aussi en **équivalent carbone**; la matière sèche contient en moyenne 45 % de carbone chez les plantes herbacées, 50 % dans le bois des arbres.

La destinée du carbone fixé dans PPN est triple:

- il peut en effet augmenter la masse de carbone présent dans la végétation (C_v);
- être consommé par des herbivores, c ;
- ou passer à l'état de matière organique morte lorsqu'il se trouve dans des tissus sénescents (M_v).

On peut donc écrire:

$$dC_v/dt = PPN - c - M_v \quad [1]$$

Avec: dC_v/dt – les variations du stock de carbone dans la végétation vivante; c – consommation; M_v – la mortalité végétale.

La biomasse des animaux (C_{an}) augmente grâce à leur consommation, elle diminue par leur respiration (R_{an}) et lorsqu'ils meurent. On peut donc écrire:

$$dC_{an}/dt = c - M_{an} - R_{an} \quad [2]$$

Avec: M_{an} – la mortalité des animaux.

Que devient la matière organique morte provenant des plantes et des animaux ?

Nous savons qu'elle est décomposée en quasi-totalité par les micro-organismes du sol qui rejettent le dioxyde de carbone lors de la respiration, le reste s'accumulant sous forme de carbone organique dans le sol (C_s): c'est l'humus, qui se reconnaît à sa couleur sombre et à sa légèreté par rapport aux particules minérales du sol. On peut écrire que l'accumulation de carbone dans le sol est égale aux apports résultant de la mortalité des plantes et des animaux moins les pertes de carbone dues à la respiration des micro-organismes (R_m):

$$dC_s/dt = (M_v + M_{an} - R_m) \quad [3]$$

Dans un écosystème non perturbé, on obtient au bout d'un temps assez long un état d'équilibre dans lequel les stocks de carbone dans les plantes, les animaux et le sol ne varient plus, ce qui implique :

$$dC_v/dt = dC_{an}/dt = dC_s/dt = 0$$

On en déduit en ajoutant les équations [1] - [2] et [3] et en éliminant c , M_{an} et M_v :

$$PPN = (R_{an} + R_m) = R_h \quad [4]$$

En appelant R_h la respiration hétérotrophe, somme des respirations des animaux et des micro-organismes du sol.

L'équation [4] signifie que, en moyenne, l'écosystème n'échange pas de carbone avec l'extérieur. Dans le cas d'une forêt non exploitée, les arbres poussent en absorbant du dioxyde de carbone, mais celui-ci provient en totalité de la

respiration de l'écosystème, qui vit donc on circuit fermé pour le carbone : la croissance des arbres compense exactement leur mortalité. En pratique, l'écosystème présente toujours quelques fuites de carbone, dans l'atmosphère sous forme d'émissions d'hydrocarbures gazeux, dans les nappes souterraines et les rivières sous forme de carbone organique dissous ou particulaire, de carbonates et de dioxyde de carbone dissous. Ces fuites sont toutefois faibles et ne représentent, dans les rares cas où elles ont été estimées, que 1 à 2 % de la production primaire nette.

12. APPROCHE GENERALE DE LA CROISSANCE

La production végétale du local au global: la production végétale du local au global est assurée grâce à la photosynthèse qui produit des glucides ou sucres. Une partie du carbone fixé est ensuite consommé par la respiration. Deux groupes de méthodes ont été mis au point pour mesurer la production végétale:

- dans le premier, on mesure l'augmentation de biomasse des plantes poussant sur une surface de sol donnée;
- dans le second, on mesure les échanges de gaz carbonique entre la plante et l'air et on en déduit la quantité de carbone accumulé en un temps donné.

Les mesures d'augmentation de biomasse: le cas le plus simple est celui d'une culture de plantes annuelles, par exemple une culture de maïs. La culture est constituée de végétaux semblables plantés à densité constante. A intervalles réguliers, on prélève dix plantes au hasard dont on mesure la biomasse moyenne après séchage à l'étuve. La masse de feuilles est mesurée séparément et on en déduit leur surface, connaissant la masse par unité de surface, déterminée sur un échantillon de feuilles.

La biomasse de la culture s'obtient en multipliant la biomasse individuelle par la densité de plantes et s'exprime en gramme de matière sèche par mètre carré de sol. La production de biomasse de la culture par unité de temps et s'exprime en gramme par mètre carré et par jour. **L'indice foliaire** s'obtient de même en multipliant la surface foliaire d'une plante par la densité de plantes et s'exprime en unités sans dimensions (mètre carrés de feuilles par mètre carré de sol). La production maximale est obtenue en général au moment de la floraison, lorsque la culture atteint son développement foliaire maximal (6 à 8 pour une culture de blé qui absorbe alors près de 95 % du rayonnement solaire visible). Les pertes par mortalité ou consommation, faibles dans les cultures, sont plus importantes dans les prairies permanentes et sont estimées en suivant, sur des plantes repérées, la dynamique de sénescence, d'apparition et de consommation des feuilles.

La production d'un couvert végétal à l'échelle d'une parcelle: tout problème posé au bio climatologue doit se comprendre dans l'entité biophysique qu'est le système sol – plante – atmosphère. Le bioclimatologue – éco physiologiste – agronome – forestier travaillera donc au niveau de la parcelle occupée par une communauté végétale, avec comme optique essentielle l'étude de la production végétale en relation avec les facteurs climatiques et pédologiques.

La production d'un couvert végétal donné est déterminée:

- (a) par le programme génétique des espèces constituant le couvert;
- (b) par les facteurs du milieu qui agit sur la vitesse d'exécution du programme de façon continue (exemple la température) ou de façon discontinue (exemple la photopériode).

Ajoutons que la productivité d'un écosystème est presque toujours limitée par les ressources du milieu (eau, ions minéraux, CO₂, éclairage...) au moins à certaines périodes dans le temps.

Les études de la bioclimatologie peuvent avoir soit un caractère descriptif (recherches des corrélations entre les facteurs climatiques et la production végétale) soit un caractère analytique (recherche de relations de causalité entre différents phénomènes, d'étude des mécanismes physiques, conception de modèles mécanistes...).

Les différents niveaux d'étude dans l'espace dépendent des moyens mis en œuvre : théoriquement, dans toute étude analytique on pourra travailler des niveaux les plus intégrés (plante entière, couvert végétal) jusqu'aux niveaux les plus réduits (métabolisme du carbone).

L'échelle de temps de ces études dépendra:

- (a) des espèces étudiées (durée de vie des espèces, phénophases, *etc...*);
- (b) du but recherché, compte tenu des variations instantanées, journalières, annuelles, des phénomènes climatiques et biologiques.

Dans l'étude de la production végétale, on peut distinguer trois niveaux d'approche :

- (a) des études de morphogénèse: études concernant les étapes de la différenciation des futurs organes;
- (b) des études de développement: études concernant la dynamique d'apparition (et de mortalité) des organes des individus;

c) des études de croissance: études concernant l'aspect quantitatif de la production de matière végétale (matière sèche), au niveau de l'organe, de la plante entière, du couvert.

Parallèlement à la croissance, et de façon synchrone, se déroule la sénescence puis la mortalité des différents organes d'un individu. En conditions naturelles, la matière végétale représente le bilan des phénomènes continus de production et de mortalité de matière.

La production primaire n'est pas appréciable directement, il existe de nombreuses méthodes d'estimation de cette production:

- (a) méthodes basées sur la récolte des compartiments en place : biomasse, masse sèche, litière...;
- (b) méthodes basées sur le suivi de l'apparition et de la disparition des différents organes;
- (c) méthodes basées sur la mesure de la photosynthèse nette, au niveau de la feuille ou du couvert.

La production de matière sèche (M.S.) est une fonction :

- (a) de la photosynthèse nette des organes qui assimilent le CO_2 (les feuilles, mais aussi les tiges, les fruits..., en fonction des espèces) ; le phénomène de photosynthèse impliquant : (a_1) l'interception de la lumière incidente dépendant de la mise en place de l'indice foliaire ; (a_2) la conversion de l'énergie captée par les feuilles en énergie chimique contenue dans la matière sèche élaborée.
- (b) de la répartition des assimilats photosynthétisés entre les parties aériennes photosynthétiques et les racines.

La photosynthèse nette et la répartition des assimilats étant sous le contrôle des facteurs du milieu, pour une espèce donnée.

On peut résumer l'équilibre existant entre la croissance aérienne et la croissance racinaire ainsi:

- (a) la plante entière (parties aériennes et racines) dépend de ses parties aériennes pour sa fourniture en carbone (nutrition carbonée – photosynthèse) ; toute limitation de l'entrée nette de carbone (réduction de l'intensité photosynthétique ; destruction partielle de la surface foliaire) favorisera la croissance aérienne relativement à la croissance racinaire et à la constitution des réserves carbonées;
- (b) la plante entière (parties aériennes et racines) dépend de ses racines pour sa fourniture en eau et en éléments minéraux. Toute limitation de la

disponibilité en eau et éléments minéraux favorisera la croissance racinaire (et les réserves carbonées des racines) relativement à la croissance aérienne.

La répartition des assimilats détermine la proportion d'organes assimilateurs de carbone (CO₂), la vitesse de croissance de la plante entière sera d'autant plus élevée qu'une proportion importante d'assimilats est investie dans les parties aériennes photosynthétiques.

La physiologie des géotypes des milieux « pauvres » est ajustée à la faible disponibilité en azote et éléments minéraux de ces milieux : une vitesse potentielle de croissance faible, donc des « besoins » en azote et éléments minéraux faible, induisant des prélèvements faibles en équilibre avec la disponibilité en éléments minéraux de ces sols ; une croissance lente due à une répartition des assimilats orientée vers les racines et les réserves carbonées ; une faible efficacité d'utilisation de l'azote pour la croissance.

Inversement, la physiologie des géotypes des milieux « riches » est en équilibre avec une disponibilité en azote et éléments minéraux élevée: une vitesse potentielle de croissance élevée, donc des « besoins » en azote élevés et satisfaits lorsque la disponibilité en azote est élevée; une forte efficacité d'utilisation de l'azote pour la croissance ; une répartition des assimilats orientée vers la croissance aérienne et donc la croissance de la plante entière leur conférant une aptitude à la compétition pour l'espace aérien et souterrain.

Field et Mooney (1984)⁷ ont réuni les données de photosynthèse de douze auteurs concernant 33 espèces en C₃ adaptées à deux niveaux de nutrition minérale très différents, et ont exprimé les capacités photosynthétiques maximales en lumière saturante ($\mu\text{Mole CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$) en fonction de la teneur en azote foliaire ($\mu\text{Mole N g}^{-1}$) : les conditions de croissance, l'âge de ces espèces sont très variables mais il ressort de ces données qu'il existerait une unique relation entre capacités photosynthétiques et teneur en azote foliaire pour tous les géotypes étudiés, suggérant que l'efficacité d'utilisation de l'azote dans le mécanisme photosynthétique serait similaire pour tous ces géotypes (à teneur en azote foliaire égale, capacité photosynthétiques égales) ; autrement dit ce caractère n'aurait pas fait l'objet d'une sélection particulière sous la pression des conditions de nutrition du milieu de ces géotypes (ce qui n'est pas le cas pour les espèces en C₃ et C₄, phénomène actuellement bien mis en évidence: Brown 1978⁸; Brown et Wilson, 1983⁹, les espèces en C₄ ont une efficacité d'utilisation de l'azote supérieure à celle des C₃).

⁷ Field C. et Mooney H.A., 1984. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants. *In*: Givnish, T.J. (éd.), *On the economy of plants form and function*, Cambridge University Press, 717 pages.

⁸ Brown 1978

13. PHOTOSYNTHESE ET MESURES DE PHOTOSYNTHESE

Le bio-climatologue s'intéressera à la photosynthèse nette du végétal, bilan biochimique de la somme de la photosynthèse brute, respiration et photorespiration:

- (a) **Photosynthèse brute** est la synthèse de la matière végétale à partir d'éléments minéraux de l'environnement CO_2 , H_2O ; l'assimilation du CO_2 en molécules carbonées exige un apport d'énergie qui est assuré par l'utilisation de l'énergie lumineuse. Chez les végétaux, ce sont les pigments assimilateurs qui sont impliqués dans les réactions de conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique : les photons absorbés par la feuille sont capables de faire émettre des électrons aux pigments assimilateurs. On peut considérer la photosynthèse comme un ensemble de réactions d'oxydoréduction;
- (b) **La respiration** est l'ensemble des réactions de dégradation des molécules complexes synthétisées lors de la photosynthèse ; son rôle est double : la simplification des molécules complexes des glucides (ce sont les plus utilisées) donne des molécules plus simples qui serviront à d'autres synthèses (exemple la synthèse des protéines) et les réactions sont productrices d'énergie;
- (c) **La photorespiration** est un phénomène comparable à la respiration et se traduisant, entre autres phénomènes, par une perte de CO_2 , la photorespiration ne se déroule qu'à la lumière, et dans les quelques minutes qui suivent le passage à l'obscurité. Toutes les plantes ne présentent pas le phénomène de photorespiration (c'est dans le cas des plantes en C_4).

Le bilan biochimique qu'est la photosynthèse nette peut être positif ou négatif, cela dépend des conditions de température, d'éclairement, des conditions hydriques, de l'âge des feuilles. L'assimilation du CO_2 exige un apport d'énergie qui est assuré par utilisation de l'énergie lumineuse, convertie en énergie chimique:



Avec $dG' > 0$ – réaction endothermique, réaction qui nécessite de l'énergie.

C'est donc en termes de rendements énergétiques que le bio-climatologue s'intéressera au phénomène de photosynthèse.

⁹ Brown et Wilson, 1983

Photosynthèse à l'échelle d'une feuille (condition optimale) : la quantité de CO₂ (ou carbone) assimilé est une fonction des caractéristiques du rayonnement incident arrivant sur la feuille (intensité, spectre, inclinaison par rapport à la feuille, *etc...*). Du rayonnement global incident (R_g) arrivant sur la feuille, une partie est réfléchi, une partie transmise et une partie absorbée. Seuls les photons visibles intéressent la photosynthèse (l'énergie lumineuse est transportée sous forme de photons), l'unité que l'on utilise est la Mole de photons, soit:

$$W=Nw=N (h c/\lambda) \quad [6]$$

Avec: W – énergie transportée par un Mole de photons (1 Einstein) à une donnée, en Jules ; N – une Mole de photons ($N_{\text{photons}}=1$ Einstein ; $N=6,02 \times 10^{23}$) ; h – constante de Planck ($h=6,62 \times 10^{-34}$), en Jules s⁻¹ ; c – vitesse de la lumière ($c=3 \times 10^{10}$), en cm s⁻¹ ; λ – longueur d'onde, en cm.

- dans le bleu ($\lambda_{470}=470$ nm), l'énergie transportée par 1 Einstein est égale à 290 Joules ;
- en rouge ($\lambda_{670}=670$ nm), l'énergie transportée par 1 Einstein est égale à 200 Joules.

En intégrant sur tout le domaine du visible, de 400 à 700 nm, on obtient l'énergie correspondant en moyenne à 1 Einstein ou 1 Mole de photons, soit 1 Einstein₄₀₀₋₇₀₀=218 k Joules.

Ainsi on parle du visible comme étant le **Rayonnement Photosynthétiquement Utilisable (PAR=45 % de R_g) ; une fraction seulement du PAR est absorbée (90 % de PAR) par la feuille le reste étant réfléchi ou absorbé mais dissipé sous forme de chaleur. Cette énergie absorbée sert à l'assimilation du CO₂ avec un rendement de 15 %, c'est le **rendement quantique**. D'après l'équation [6] $dG'=472$ k Joules, or dans la feuille l'assimilation de 1 Mole de CO₂ exige l'absorption de 14 Einstein dans le visible (14 Moles de photons), soit 14×218 k Joules: l'assimilation de 1 Mole de CO₂ s'effectue avec un rendement de 15 % [$472/(14 \times 218)=0,15$] par rapport au rayonnement global [$0,06=472/(14 \times 218)) \times 0,90 \times 0,45$]. Sur une base journalière, en tenant compte des pertes par respiration, le rendement par rapport au rayonnement global est de 1 à 2 %.**

Quelques chiffres:

- 1 Mole de CO₂ $\leftarrow \rightarrow$ 14 g Carbone (14 g Carbone)
- Il y a 0,5 g de Carbone dans 1 g de masse sèche (M.S.)

Photosynthèse à l'échelle du couvert (condition optimale) : de Wit (1958)¹⁰ a introduit le concept de production potentielle, c'est la quantité de matière sèche (M.S.) qui pourrait être élaborée par une végétation couvrant entièrement le sol si:

- (a) sa photosynthèse fonctionnait avec un rendement quantique maximal;
- (b) sa photosynthèse n'était limitée que par le rayonnement incident, soit 71 g M.S. m⁻² jour⁻¹ avec R_g = 21 M J m⁻² jour⁻¹.

La distribution du rayonnement dans un couvert peut s'exprimer d'après l'équation :

$$Rn_{(z)} = Rn_{(0)} \exp^{(-k LAI)} \quad [7]$$

Avec: Rn_(z) – rayonnement net sous une couche de végétation d'indice foliaire LAI, en W m⁻²; Rn₍₀₎ – est sa valeur au-dessus du couvert, en en W m⁻²; k – coefficient d'extinction (de 0,35 à 0,90) qui dépend du port des feuilles (vertical-horizontal) et de leurs propriétés optiques; LAI – indice foliaire.

La production réelle est évidemment inférieur car la végétation ne couvre pas entièrement le son, la teneur de 330 ppm en CO₂ de l'atmosphère est limitant, les températures ne sont pas optimales (ou trop basses ou trop élevées), l'eau est limitant, les éléments minéraux (azote) sont limitant en règle générale.

Mesures de photosynthèse: Les échanges de gaz carbonique peuvent être mesuré dans un système ouvert au moyen d'un analyseur à infrarouge (par exemple de type LCA2 d'Analytical Development Company) et d'une chambre d'assimilation.

¹⁰ De Wit C.T., 1958. Transpiration and crop yields. Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, 64, 1-88

14. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO)

Résumé. - Depuis 1950 environ, la savane du littoral congolais est progressivement plantée d'Eucalyptus en peuplements denses exploités par rotations d'environ sept ans. Pour apprécier la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus, il faut faire l'étude comparée des bilans énergétique, carboné, minéral et hydrique des deux écosystèmes, l'écosystème d'origine, la savane, et l'écosystème artificiel qui lui a succédé, les plantations d'Eucalyptus.

L'objectif de ce travail est d'étudier le bilan hydrique des deux écosystèmes et, plus particulièrement, leur évapotranspiration réelle (transpiration et évaporation). La futaie d'Eucalyptus étudiée est âgée de cinq ans (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*), a une hauteur moyenne de 24,2 m, une circonférence moyenne de 53,4 cm, une densité de 502 arbres ha⁻¹, une surface terrière de 11,0 m² ha⁻¹, un indice foliaire de 3,2 et un volume de bois de 118,5 m³ ha⁻¹. La savane étudiée est une savane à *Loudetia arundinacea*. On a mesuré toutes les semaines en saison des pluies de novembre 1996 à avril 1997, de novembre 1997 à avril 1998, de novembre 1998 à avril 1999 et en saison sèche, de juin à septembre 1997 et de juin à septembre 1998, les précipitations incidentes, les précipitations au sol (pluviomètres) et la réserve en eau du sol (sonde à neutrons, sonde TDR).

L'évapotranspiration, l'interception et la transpiration de la plantation et de la savane ont été estimées à partir de l'équation du bilan hydrique. La transpiration de la plantation a aussi été estimée par la méthode du flux de sève. L'établissement des profils hydriques du sol (humidité volumique et potentiel hydrique en fonction de la profondeur) nous a donné les zones d'absorption préférentielle et la profondeur de sol exploitée par ces communautés: 5 m pour la plantation d'Eucalyptus et 3 m pour la savane. Le drainage dans la plantation est moindre que celui dans la savane; cumulé sur trois ans, il est de 470,3 mm dans la plantation et de 827,3 mm dans la savane.

La plantation d'Eucalyptus est un écosystème artificiel qui absorbe/transpire toute l'année et qui consomme toute l'eau disponible. La succession de plusieurs années déficitaires réduira la production de bois de la plantation, mais sachant qu'entre 1950 et 1998, il n'y a eu qu'un seul épisode de quatre années déficitaires successives dans le bassin du Kouilou, et compte tenu de la durée de rotation de sept ans, cet épisode « sec » ne compromet pas la survie de la plantation, mais réduit seulement sa production. La savane a un cycle de végétation tel qu'à la fin de la saison sèche (septembre), il subsiste dans le sol de l'eau qui représente 15% de R_{RU}, lui permettant de subir trois années déficitaires successives sans incidence sur sa production.

Mots clés : durabilité, plantation, Eucalyptus, savane, bilan d'eau, évapotranspiration.

1. INTRODUCTION

Depuis 1950 environ, la savane du littoral congolais (figure 1) est progressivement plantée d'Eucalyptus en peuplements denses exploités par rotations d'environ sept ans (Laclau *et al.*, 2000). Des plantations sont dites durables si elles répondent à de multiples critères, sociologiques, politiques, économiques et écologiques qui ont été redéfinis par le rapport de Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987). La durabilité de ces plantations d'Eucalyptus correspondrait à la situation théorique pour laquelle un écosystème proche de la savane d'origine succéderait à ces plantations si on cessait de les cultiver, ce qui suppose que les conditions climatiques régionales et pédologiques n'aient pas

été radicalement modifiées par l'existence de ces plantations. Pour apprécier la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus, il faut faire l'étude comparée des bilans énergétiques, carbonés, minéraux et hydriques des deux écosystèmes, l'écosystème d'origine, la savane, et l'écosystème artificiel qui lui a succédé, les plantations d'Eucalyptus.

L'objectif de ce travail est d'étudier le bilan hydrique des deux écosystèmes et, plus particulièrement, leur évapotranspiration réelle (transpiration et évaporation). La transpiration est le moteur du transfert de l'eau à travers la plante : il se crée une différence de potentiel hydrique entre les feuilles et les racines qui est à l'origine du flux d'absorption (une pompe hydraulique aspirante transférant l'eau du sol vers l'atmosphère, *i.e.* le continuum sol-plante-atmosphère).

La transpiration d'un écosystème est déterminée par :

- la demande évaporative de l'atmosphère (évapotranspiration potentielle) dépendant du rayonnement solaire, du déficit de l'humidité de l'air, de la température et de la vitesse du vent ;
- les mécanismes physiologiques de régulation stomatique du couvert, dépendant du génotype;
- la structure du couvert végétal et, plus particulièrement, l'indice foliaire ;
- la quantité d'eau disponible pour la végétation, via la réserve utile du sol ;

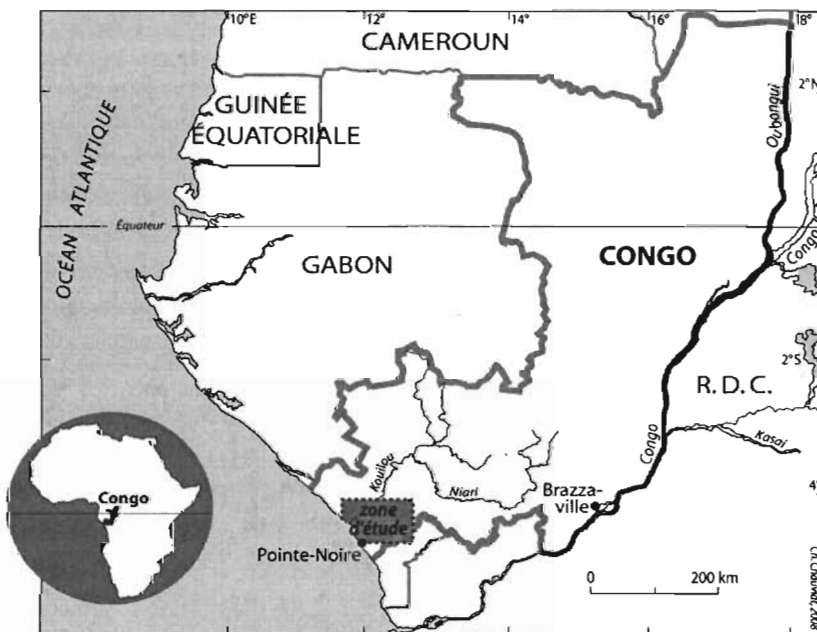


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude: région du Kouilou, sur la façade atlantique de la République du Congo (surface de 13 315 km², située entre le Cabinda au sud et le Gabon au nord); cette région est soumise à un climat tropical humide de type équatorial de transition (climat bas-congolais). La façade maritime du Congo constitue la partie septentrionale de la zone plus sèche qui borde le continent africain au sud-ouest) avec des précipitations moyennes annuelles de $P_{1949-98}=1188,4$ mm, une évapotranspiration potentielle (Penman) de 1390,4 mm.an⁻¹ ($ETP_{92-98}=3,8$ mm jour⁻¹; $ETP_{PLUIES}=4,2$ mm jour⁻¹, $ETP_{SÈCHE}=3,2$ mm jour⁻¹), une température moyenne de l'air de 24,9°C ($t_{max}=28,2$ °C, $t_{min}=21,9$ °C), une humidité relative de l'air de 81,1% ($H_{max}=95,5$ %, $H_{min}=66,4$ %) ; moyennes calculées sur la période 1949-1998 à la station de référence de Pointe-Noire. La saison des pluies s'étale sur environ 150 jours de novembre à avril, la saison sèche va de juin à septembre ; les mois de mai et octobre sont considérés comme des mois de transition. La zone d'étude se situe dans le bassin sédimentaire côtier tertiaire (pliocène), de la série de cirques avec grès argileux, sables et argile. Les sols des stations d'études sont des sols ferrallitiques fortement dessaturés à texture sablo-argileuse (Vennetier, 1968). Les deux stations d'études sont situées à 40 km de Pointe-Noire à proximité du lieu-dit Kondi (latitude 4°34'S, longitude 11°54'E, altitude: 125 m).

L'Eucalyptus a été choisi pour sa croissance rapide, les rotations étant de sept ans. Des plantations d'Eucalyptus durables seraient des plantations dont la consommation en eau ne serait pas « excessive », les clones utilisés consommant moins que d'autres clones d'Eucalyptus ou que certaines autres espèces (par exemple *Pinus caribaea*).

Cette étude fournira les données nécessaires à la calibration d'un modèle hydrique permettant aux équipes de l'UR2PI de Pointe-Noire (Unité de Recherche sur la Productivité des Plantations Industrielles), du CIRAD et de l'INRA de Nancy d'étudier sur les mêmes sites le cycle des éléments minéraux majeurs (N, P, K, Ca, Mg) constituant des aspects de la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus (Bouillet *et al.*, 1999).

2. MATERIEL ET METHODES, STATIONS D'ETUDES ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'expression simplifiée du bilan hydrique du sol d'une savane (photo 1) ou d'une plantation d'Eucalyptus (photo 2) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_i = ETR + D \pm \Delta R / \Delta t \quad [1]$$

$$\text{où } ETR = T + I_n + E_s \quad [2]$$

$$\text{et } I_n = P_i - (P_s + E_c) \quad [3]$$

avec: P_i - précipitations incidentes, en mm jour⁻¹; ETR - évapotranspiration réelle du peuplement, en mm jour⁻¹; D - drainage, en mm jour⁻¹; ΔR - variation de la réserve en eau du sol, en mm; Δt - pas de temps des calculs, en jours; T - transpiration, en mm jour⁻¹; I_n - interception nette, en mm jour⁻¹; E_s , évaporation du sol, en mm jour⁻¹; P_s - précipitations au sol, en mm jour⁻¹; E_c - écoulement le long des troncs pour la plantation, en mm jour⁻¹.

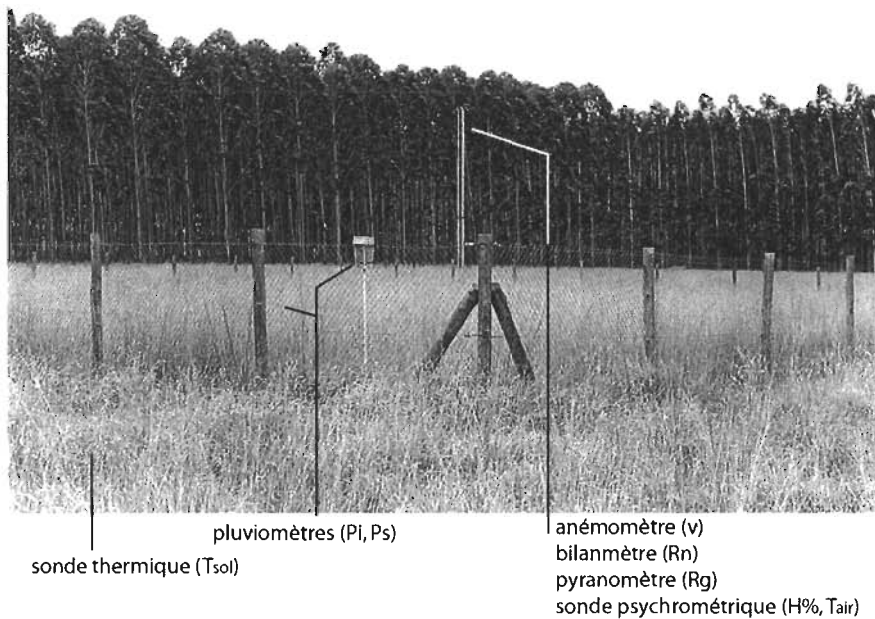


Photo 1 : Vue de la station d'étude n°1: une savane dominée à 90% par *Lutetia arundinacea* (hauteur moyenne de 1,5 m; biomasse maximale de 3,5 tonnes ha⁻¹ et masse morte maximale de 4,6 tonnes ha⁻¹, indice foliaire de 4,3; zone racinaire de 3 m ; capacité au champ $R_{CC}=363$ mm; point de flétrissement permanent $R_{PFP}=181,8$ mm; réserve utile $R_{RU}=181,2$ mm).

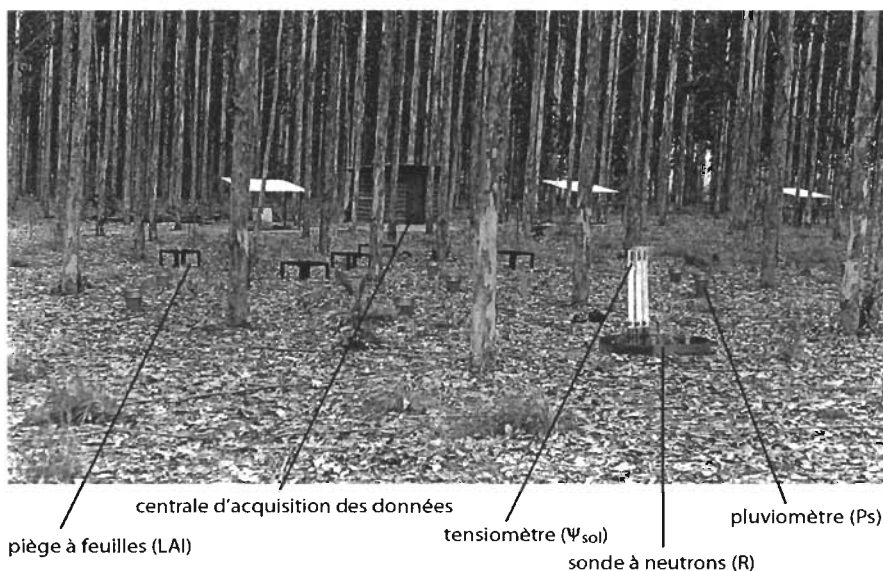


Photo 2 : Vue de la station d'étude n°2: une futaie d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*) plantés en janvier 1992 à l'état de plantules issues de boutures, plantules d'environ 0,3 m de hauteur) de cinq ans plantés selon des rangs orientés sud-ouest avec un écartement de 4 m entre deux individus d'une même ligne et un écartement de 4,7 m entre deux lignes: hauteur moyenne de 24,2 m; circonférence moyenne de 53,4 cm; densité de 502 arbres ha⁻¹; surface terrière de 11,0 m² ha⁻¹; indice foliaire de 3,2; volume de bois de 118,5 m³ ha⁻¹; zone racinaire de 5 m; capacité au champ R_{CC}=617,6 mm; point de flétrissement permanent R_{FPF}=309,2 mm; réserve utile R_{RU}=308,4 mm.

Cette expression considère comme négligeable l'évaporation directe du sol et de la litière, approximation raisonnable seulement en période de dessèchement. La réserve en eau du profil du sol (R), les précipitations au dessus du peuplement (Pi) et au sol (Ps) ainsi que l'écoulement le long des troncs (E_c) ont été mesurés; les valeurs du drainage (D), l'évapotranspiration (ETR), l'interception (In) et la transpiration (T) de la plantation et de la savane ont été estimées à partir de l'équation du bilan.

Par ailleurs, la transpiration de la plantation est estimée par la méthode du flux de sève : l'eau ayant une très forte chaleur massique, la méthode est basée sur la mesure de la vitesse de déplacement d'une onde thermique suite à l'émission d'une brève impulsion de chaleur (Granier, 1987). Dans l'équation du bilan, on suppose que l'ETR soit égale à l'ETP (évapotranspiration potentielle) en période humide (réserve du sol à la capacité au champ, R_{CC}) et, au contraire, un drainage nul en période sèche (réserve du sol inférieure à la capacité au champ). Dans le bilan hydrique du sol à l'échelle d'une journée, les valeurs de l'ETR sont calculées comme suit :

$$\text{Si } R > R_{CC}, \text{ alors } ETR = ETP \text{ et } D = Pi - ETP \pm \Delta R / \Delta t \quad [4]$$

$$\text{Si } R < R_{CC}, \text{ alors } D = 0 \text{ et } ETR = Pi \pm \Delta R / \Delta t \quad [5]$$

Avec: ETP - évapotranspiration potentielle en mm jour⁻¹.

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, nous avons utilisé la formule de Penman (1948). Les valeurs ont été calculées chaque jour pour les deux stations d'études, puis cumulées sur les durées correspondant aux intervalles de mesures. Cette équation est applicable pour un couvert dense et étendu (*i.e.* > 100 m²).

$$ETP = (\Delta Rn / \lambda + \gamma Ea) / (\Delta + \gamma) \quad [6]$$

avec: R_n - rayonnement net ou effectif, en $W m^{-2}$; λ - chaleur latente de vaporisation, en $J kg^{-1}$ ($2451,8 J g^{-1}$); γ - constante psychrométrique, en $kPa ^\circ C^{-1}$; E_a - évaporation d'une surface dont la température serait celle de l'air, mesurée sous abri, en $mm jour^{-1}$; Δ - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en $kPa ^\circ C^{-1}$,

$$\text{où : } R_n = (1-a)R_g - (R_a - R_t) \quad [7]$$

Avec: R_n - rayonnement net ou effectif, en $W m^{-2}$; R_g - rayonnement solaire global, en $W m^{-2}$; R_a - rayonnement atmosphérique, en $W m^{-2}$; R_t - rayonnement terrestre, en $W m^{-2}$; a - albédo de la surface (albédo de la plantation d'Eucalyptus: $a=0,13$; albédo de la savane: $a=0,25$).

L'hypothèse d'un drainage nul lorsque $R < R_{CC}$ est liée à la texture sableuse du sol, qui implique une chute très rapide de conductivité hydrique avec le dessèchement du sol. Elle n'est strictement vraie que lorsque l'humidité de l'horizon le plus profond est devenue inférieure de quelques points à sa valeur à la capacité au champ. Dans les deux cas (équations [4] et [5]), la transpiration du peuplement est calculée en soustrayant l'interception nette (I_n) calculée à l'aide de l'équation [8] de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

$$T = ETR - I_n \quad [8]$$

Ces calculs utilisent les notions de capacité de rétention en eau maximale du sol de la zone racinaire (capacité au champ, R_{CC}), de capacité de rétention minimale (point de flétrissement permanent, R_{PFP}) et d'évapotranspiration potentielle (ETP). La zone exploitée par les racines a été bien délimitée (5 m pour la plantation et 3 m pour la savane); d'autre part, les caractéristiques topographiques et pédologiques sont telles qu'il n'y a sur les stations d'expérimentation ni nappe phréatique proche, ni ruissellement en surface et dans le sol (pente proche de $\pm 1 \%$). Nous avons déterminé les valeurs de R_{CC} et R_{PFP} *in situ* comme étant les valeurs maximale et minimale de la réserve en eau. Le tableau 1 synthétise l'ensemble des mesures effectuées (type de mesure, fréquence, caractéristique du matériel utilisé).

Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de Pointe-Noire, située à 40 km au sud des stations d'études (Direction de l'Exploitation Météorologique de l'ASECNA, Aéroport de Pointe-Noire, latitude $4^\circ 49'S$, longitude $11^\circ 54'E$, altitude 16 m IGN). Les données météorologiques issues respectivement de la station météorologique et du site d'étude ont été comparées en 1996 par Nizinski *et al.* (2002) et sont similaires.

fréquence	type de mesure	matériel
hebdomadaire	précipitations incidentes précipitations au sol écoulement le long des troncs réserve en eau du sol	pluviomètre pluviomètres gouttières sonde à neutrons tarière sonde TDR
journalière	température moyenne de l'air humidité relative de l'air pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air pression atmosphérique durée d'insolation vitesse du vent	station météorologique
<i>Ces mesures en continu sont stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger 21XL (Campbell)</i>	pas de temps 1 heure flux de sève potentiel foliaire transpiration foliaire résistance stomatique potentiel hydrique du sol	thermocouples chambre à pression PMS poromètre AP4, Delta-T-Devices poromètre AP4, Delta-T-Devices tensiomètres
	pas de temps 20 minutes humidité relative de l'air température moyenne de l'air vitesse du vent rayonnement global rayonnement net température moyenne du sol	sonde " Vaisala " } sonde " Vaisala " } <i>mesures à :</i> anémomètre " A100-Vector " } 2 m } et } 5 m pyranomètre Licor } bilanmètre REBS/Q-7, Campbell } 6 m sonde 107, Campbell } 0,05 m } et } 0,15 m

Tableau 1 : Acquisition des données, type et fréquence des mesures et caractéristiques de matériel.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. CLIMAT LOCAL ET TYPE DE COUVERT

Les résultats concernent la période allant du 17 février 1997 au 26 juillet 1999. Nous nous servons de la classification de Vennetier (1968) qui décompose l'année pluviométrique en saison des pluies de novembre à avril (ici 1996-97, 1997-98 et 1998-99), saison sèche de juin à septembre (ici 1997 et 1998) ; les mois de mai et octobre sont considérés comme des mois de transition. Les précipitations incidentes annuelles (P_i) et l'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP) ont été respectivement en 1996 de 1149,8 et 1352,8 mm an^{-1} ; pour 1997, de 1231,3 et 1356,7 mm an^{-1} ; pour 1998, de 1273,8 et 1389,5 mm an^{-1} . Ces trois années sont très proches des moyennes annuelles de P_i et de ETP établies de 1949 à 1998 pour P_i et de 1992 à 1998 pour ETP, respectivement $P_{i_{49-98}}$ de 1188,4 mm an^{-1} et ETP_{92-98} de 1390,4 mm an^{-1} (tableau 2).

Nous avons ensuite comparé les précipitations incidentes à la moyenne calculée sur 49 ans ($P_{i_{49-98}}=1034,3$ mm): la saison des pluies 1996-97 est déficitaire par rapport à la moyenne ($P_{i_{96-97}}=459$ mm, soit 44 % de $P_{i_{49-98}}$) ; les précipitations de la saison des pluies 1997-98 ($P_{i_{97-98}}=1338$ mm, soit 129 % de $P_{i_{49-98}}$) et de celle de 1998-99 ($P_{i_{98-99}}=1140$ mm, soit 110% de $P_{i_{49-98}}$) sont supérieures à la moyenne. L'ETP est proche de la moyenne 1992-98 ($ETP_{92-98}=1390$ mm an^{-1}) sur toute l'étude soit, pour 1996, 1353 mm an^{-1} (97% de ETP_{92-98}), pour 1997, 1357 mm an^{-1} (98% de ETP_{92-98}), pour 1998, 1389 mm an^{-1} (99% de ETP_{92-98}).

	SAISONS DES PLUIES - 1er novembre au 30 avril (181 jours)								SAISONS SÈCHES - 1er juin au 30 septembre (122 jours)					
	1996-1997		1997-1998		1998-1999		moyenne 1996-1999		1997		1998		moyenne 1997-1998	
	<i>Eucalyptus</i>	Savane	<i>Eucalyptus</i>	Savane	<i>Eucalyptus</i>	Savane	<i>Eucalyptus</i>	Savane	<i>Eucalyptus</i>	Savane	<i>Eucalyptus</i>	Savane	<i>Eucalyptus</i>	Savane
Rayonnement net (Rn) W m ⁻²	416,9	345,5	441,9	366,6	435,5	359,8	431,4	357,3	272,4	223,2	290,3	238,1	281,4	230,7
Evapotranspiration potentielle (ETP) mm mm jour ⁻¹	780,5 4,3	717,2 4,0	851,5 4,7	779,2 4,3	856,7 4,7	785,0 4,3	829,6 4,6	760,5 4,2	373,9 3,1	347,8 2,9	402,4 3,3	3,1	388,2 3,2	361,2 3,0
Précipitations incidentes (Pi) mm mm jour ⁻¹	459,3 2,5	459,3 2,5	1338,5 7,4	1338,5 7,4	1139,9 6,3	1139,9 6,3	979,2 5,4	979,2 5,4	15,5 0,1	15,5 0,1	63,5 0,5	63,5 0,5	39,5 0,3	39,5 0,3
Précipitations au sol (Ps) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	412,3 2,3 89,8	422,5 2,3 92,0	1198,0 6,6 89,5	1206,3 6,7 90,1	991,0 5,5 86,9	1005,5 5,6 88,2	867,1 4,8 88,7	878,1 4,9 90,1	9,8 0,1 63,1	13,4 0,1 86,6	39,9 0,3 62,9	47,1 0,4 74,2	24,8 0,2 63,0	30,3 0,2 80,4
Ecoulement le long des troncs (Ec) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	9,2 0,1 2,0		26,8 0,1 2,0		22,8 0,1 2,0		19,6 0,1 2,0		0,3 0,0 2,0		1,3 0,0 2,0		0,8 0,0 2,0	
Interception nette (In) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	47,0 0,3 10,2	36,8 0,2 8,0	140,5 0,8 10,5	132,2 0,7 9,9	148,9 0,8 13,1	134,4 0,7 11,8	112,1 0,6 11,3	101,1 0,6 9,9	5,7 0,0 36,9	2,1 0,0 13,4	23,6 0,2 37,1	16,4 0,1 25,8	14,7 0,1 37,0	9,2 0,1 19,6
Transpiration (T) mm mm jour ⁻¹	693,2 3,8	436,2 2,4	707,8 3,9	584,6 3,2	564,7 3,1	412,7 2,3	655,2 3,6	477,8 2,6	93,9 0,8	112,2 0,9	242,8 2,0	112,2 0,9	168,4 1,4	112,2 0,9
Evapotranspiration (ETR) mm mm jour ⁻¹	740,2 4,1	473,0 2,6	848,3 4,7	716,9 4,0	713,6 3,9	547,1 3,0	767,4 4,2	579,0 3,2	99,7 0,8	114,3 0,9	266,4 2,2	128,6 1,1	183,0 1,5	121,5 1,0
Drainage (D) D = Ps+Ec-ETR mm R _{30.04} , mm R _{1.11} , mm dR = R _{30.04} - R _{1.11} , mm D = Ps+Ec-ETR-dR mm mm jour ⁻¹	0,0 377,6 361,1 16,5 0,0 0,0	0,0 360,9 222,3 138,5 0,0 0,0	376,4 508,1 338,7 169,4 207,1 1,1	489,4 337,8 238,1 99,7 389,7 2,2	300,2 462,8 425,8 37,0 263,2 1,5	458,4 347,0 326,2 20,8 437,6 2,4	225,6 315,9 225,6 156,8 275,8 0,9	315,9 315,9 315,9 275,8 275,8 1,5	0,0 345,3 311,8 33,5 0,0 0,0	0,0 298,6 230,2 68,5 0,0 0,0	0,0 484,8 380,3 104,5 0,0 0,0	0,0 297,8 344,1 -46,3 0,0 0,0	0,0 297,8 344,1 -46,3 0,0 0,0	0,0 183,0 121,5 0,0 0,0 0,0

Tableau 2 : Rayonnement net (Rn), précipitations incidentes (Pi), précipitations au sol (Ps), interception nette (In), transpiration (T), drainage (D), évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP). Valeurs cumulées durant les saisons des pluies et saisons sèches du 17 février 1997 au 26 juillet 1999: (a) plantation d'*Eucalyptus* (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*); (b) savane à *Loudetia arundinacea*.

Le peuplement d'*Eucalyptus* (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*) a des feuilles toute l'année (indice foliaire de 3,2), donc absorbe/transpire toute l'année. Les herbacées de la savane (dominée par *Lutetia arundinacea*, présence de *Elyonrus brazzae*, *Ctenium newtonii*, *Rhynchelytrum nerviglume*, *Lutetia simplex*, *Probelaniceps*, *Eroseta glomeratum*, *Cassia mimosoides*, *Cyanotis*) sont des plantes annuelles qui absorbent et transpirent pendant la saison des pluies, et pendant les mois de transition (mai et octobre), avec un indice foliaire moyen de 2,9 et un maximum de 4,1 en février (Nizinski *et al.*, 2002).

3.2. COUVERTS ARBORESCENT ET HERBACEE : INCIDENCE SUR LES ELEMENTS DU BILAN HYDRIQUE

Le bilan hydrique du sol dépend du type de couvert (par sa structure : étendue, taille, rugosité, présence ou absence des feuilles, pigmentations, *etc*), le type de couvert conditionnant le bilan radiatif et énergétique Rn – voir équation [7]) : la quantité de rayonnement solaire absorbée par les surfaces (dépendant de l'albédo) est dissipée, pour l'essentiel, dans l'air environnant sous forme de chaleur latente (λE - utilisé dans le processus d'évaporation d'eau) et sous forme de chaleur sensible (H - température ambiante). Les valeurs de l'albédo utilisées dans le calcul de l'ETP pour les années 1996 et 1997 (albédo $a_{EUCALYPTUS}=0,13$ et $a_{SAVANE}=0,25$) sont issues de la bibliographie de Pinker *et al.*, 1980. Ces valeurs ont été vérifiées par des mesures *in situ* en septembre 1998 ($a_{EUCALYPTUS}=0,12$ et $a_{SAVANE}=0,23$; Nizinski *et al.*, 2002).

Pour la période 1992-98 (durée de vie prévue de la plantation étudiée; tableau 2), la moyenne du **rayonnement net** moyen journalier ($W m^{-2}$) est pour la plantation et pour la savane respectivement de 387 et 320 $W m^{-2}$ (voir le détail des valeurs de la saison des pluies et de la saison sèche; tableau 2). Ainsi, la quantité d'énergie disponible pour la plantation est supérieure à l'énergie disponible pour la savane de 74 $W m^{-2}$ en saison des pluies et de 51 $W m^{-2}$ en saison sèche, d'où une quantité d'énergie utilisée pour évaporer l'eau supérieure au sein de la plantation par rapport à la savane. Le rayonnement net moyen journalier pendant les années 1996, 1997 et 1998 (tableau 2) est inférieur à la moyenne établie sur la période 1992-98; nous avons, pour la plantation et la savane, respectivement 3385 et 319 $W m^{-2}$ en 1996 ; 367 et 303 $W m^{-2}$ en 1997 ; 377 et 311 $W m^{-2}$ en 1998.

Les valeurs de R_n de la savane (moyenne sur les trois années étudiées) sont comparées à celles obtenues par Riou (1975) au Centre ORSTOM de Brazzaville pour un gazon bien alimenté en eau pour la période 1968-71 (240 $W m^{-2}$ en saison des pluies et 166 $W m^{-2}$ en saison sèche). Ces valeurs sont supérieures respectivement de 117 et de 65 $W m^{-2}$ aux nôtres, la différence étant due au type de surface et à la durée d'insolation de Pointe-Noire supérieure à celle de Brazzaville.

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 1992-98 est de 1395 $mm an^{-1}$ (3,8 $mm jour^{-1}$ sur l'année, 4,1 en saison de pluies et 3,1 en saison sèche). Elle est proche de celle estimée par Riou (1975), calculée suivant la même formule de Penman pour la région de Brazzaville ($ETP_{68-71}=1420 mm an^{-1}$). L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 1996-98 (tableau 2) a été respectivement pour la plantation et pour la savane de 830 et de 760 mm (4,6 et 4,2 $mm jour^{-1}$) en saison des pluies et de 388 et de 361 (3,2 et 3 $mm jour^{-1}$) en saison sèche.

Les précipitations au sol et l'interception nette moyenne sur les trois saisons des pluies s'élèvent respectivement à 867 et 112 mm (89 et 11% de P_i) pour la plantation d'*Eucalyptus* et à 878 et 101 mm (90% et 10% de P_i) pour la savane. Pour la plantation d'*Eucalyptus*, les valeurs sont proches de celles obtenues par George (1978) pour un peuplement d'*Eucalyptus tereticornis* en Inde âgé de 6 ans ($P_i=1670 mm an^{-1}$) pour lequel $I_n=12\%$ de P_i ; nous citerons aussi Calder (1986) concernant un peuplement d'*Eucalyptus saligna* âgé de 6 ans au Brésil ($P_i=1280 mm an^{-1}$) pour lequel $I_n=12\%$ de P_i , ainsi que Smith (1974) concernant un peuplement d'*Eucalyptus regnans* en Australie ($P_i=810 mm an^{-1}$) pour lequel $I_n=11\%$ de P_i . En moyenne, sur les trois années étudiées, les entrées d'eau sous forme de précipitations au sol de la plantation sont inférieures de 11 mm à celles de la savane; mais si on ajoute l'écoulement le long des troncs (19,6 mm), les entrées d'eau dans la plantation sont alors de 8,6 mm supérieures à celles de la savane. La capacité maximale de rétention en eau des deux types de couvert, 0,9 mm pour la plantation et 0,6 mm pour la savane, explique ces valeurs ainsi que celles de l'interception nette. On comparera les valeurs de capacité maximale de rétention en eau du couvert de la plantation à celles citées par Calder (1986) à propos de plantations d'*Eucalyptus* se situant à Fiji (valeurs comprises entre 0,8 et 1,4 mm).

3.3. ELEMENTS DU BILAN : TRANSPIRATION, T/ETP, EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET DRAINAGE

La transpiration moyenne saisonnière et moyenne journalière sur les trois années 1996, 1997 et 1998, pour la plantation et pour la savane, est respectivement de 655 et de 478 mm (3,6 et 2,6 $mm jour^{-1}$) en saison des pluies, et de 168 et 112 mm (1,4 et 0,9 $mm jour^{-1}$) en saison sèche. Pour de nombreux peuplements d'*Eucalyptus*, la transpiration moyenne journalière

varie de 3 à 5 mm jour⁻¹ en conditions hydriques non limitantes, avec des maxima journaliers allant jusqu'à 6-8 mm jour⁻¹ selon Dye (1987) et des minima de 1 à 3 mm jour⁻¹ selon Roberts et Rosier (1993).

L'indice foliaire maximal (LAI, Leaf Area Index) obtenu pour notre station d'Eucalyptus est de 3,2. Cette valeur est proche de celles de peuplements comparables. Selon Roberts *et al.* (1992), pour des peuplements indiens âgés de 6 ans, il est de 2,2 pour *Eucalyptus tereticornis* et de 2,3 pour *Eucalyptus camaldulensis*; selon Gazarini *et al.* (1990), il est de 3,8 pour *Eucalyptus grandis* âgé de 6 ans et situé au Portugal et, selon Beadle *et al.* (1995), de 3 à 4,5 pour *Eucalyptus globulus* âgé de 4 ans et situé en Australie.

La résistance stomatique moyenne du couvert d'Eucalyptus, r_s (moyenne établie de 1996 à 1998) a été calculée en utilisant le modèle de Jarvis (Stewart, 1988). Elle dépend (a) de la résistance stomatique minimale r_{smin} mesurée dans des conditions supposées non limitantes et disponibilité en eau, (b) de l'indice foliaire, (c) du rayonnement net, (d) du déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air, (e) de la différence entre la réserve en eau à la capacité au champ et la réserve en eau du moment RCC-R. Pour un indice foliaire de 3,2, la résistance stomatique minimale est de 6,1 m s⁻¹ en saison des pluies et de 16,7 m s⁻¹ en saison sèche. Nos valeurs de résistance stomatique minimale en saison des pluies recourent celles de Beadle *et al.* (1995): en conditions hydriques non limitantes, la résistance stomatique minimale moyenne d'un couvert d'Eucalyptus (valeurs moyennes annuelles de plusieurs peuplements) est de 5,9 m s⁻¹ pour un indice foliaire de 3,5. La résistance stomatique minimale moyenne de la savane est respectivement de 3,5 m s⁻¹ en saison des pluies et de 5,4 m s⁻¹ en saison sèche pour un indice foliaire compris entre 2,6 en août à 4,1 en février.

La transpiration (T) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) varient dans le temps, et le rapport T/ETP (transpiration relative) varie en fonction de l'état hydrique du sol. La variation de T/ETP en fonction de la réserve en eau du sol, exprimée relativement à la réserve à la capacité au champ (R/R_{CC}), dépend de l'espèce et rend compte de sa régulation stomatique. Pour la plantation (figure 2), le rapport T/ETP diminue suivant une courbe hyperbolique de 1 à 0-0,2, valeur correspondant à une réserve en eau du sol proche du point de flétrissement permanent (53% de R_{CC}, soit 328 mm).

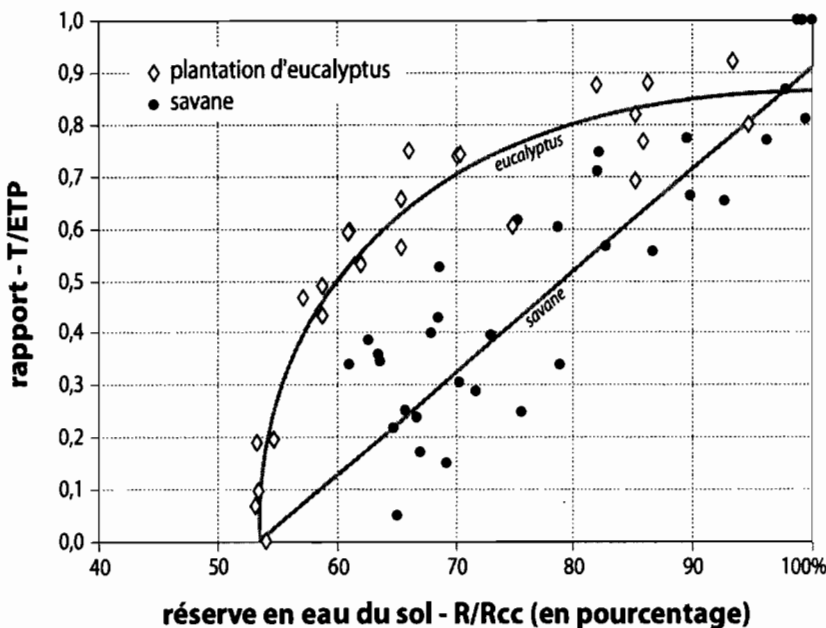


Figure 2 : Relation entre la transpiration relative du peuplement transpiration/évapotranspiration potentielle, T/ETP) et la réserve en eau du sol (valeurs moyennes mensuelles du 17 février 1997 au 26 juillet 1999: (a) plantation d'Eucalyptus (*Eucalyptus PFI* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*); (b) savane à *Loudetia arundinacea*.

La valeur moyenne de la saison des pluies (0,79, sol bien alimenté en eau, $R \approx R_{CC}$) est proche de celle citée par George (1978) pour des peuplements identiques situés en Inde, âgés de 6 ans et dans des conditions similaires pour lesquels $T/ETP=0,81$ (*Eucalyptus tereticornis*, $P_i=1670$ mm an⁻¹). Calder (1986) a étudié des peuplements d'*Eucalyptus saligna* âgés de 6 ans, au Brésil ($P_i=1280$ mm an⁻¹) pour lesquels $T/ETP=0,84$. Myers *et al.* (1996) ainsi que Honeysett *et al.* (1996) donnent une valeur T/ETP comprise entre 0,76 et 0,86 pour un peuplement d'Eucalyptus situé en Australie et en Tasmanie ayant un LAI de 2,8 à 3,1 (*Eucalyptus grandis*).

La variation du rapport T/ETP de la savane en fonction de l'état hydrique du sol (figure 2) est différente de celle de la plantation: T/ETP varie de façon linéaire en fonction de R/R_{CC} ; la valeur moyenne de T/ETP est de 0,61 pendant la saison des pluies (R proche de $R_{CC}=363$ mm) et de 0,34 pendant la saison sèche (R proche de 51% de R_{CC} , soit 185 mm). Alors que l'on observe pour la plantation des valeurs nulles de T/ETP (pour R proche du RPPF), les valeurs les plus faibles observées pour la savane vont de 0,19 à 0,25. Et quelle que soit la réserve en eau du sol, pour une valeur donnée de cette réserve en eau du sol, la transpiration relative de la plantation est toujours supérieure à celle de la savane. On pourra qualifier le type de régulation stomatique de la plantation comme « peu marqué ». Lors de la saison des pluies des trois années étudiées, la plantation a évapotranspiré en moyenne 767 mm d'eau, soit une ETR moyenne journalière de 4,2 mm jour⁻¹. Dye (1987) donne une valeur d'ETR de 4,7 mm jour⁻¹, valeur moyenne journalière en saison des pluies, calculée sur 57 jours, pour un peuplement d'*Eucalyptus grandis* situé dans le Transvaal Oriental en Afrique du Sud ($P_i=1250$ mm an⁻¹, peuplement âgé de 6 ans, hauteur de 21,9 m, 725 arbres ha⁻¹, LAI=4,23). Pendant les mêmes périodes, la savane a évapotranspiré 579 mm d'eau, soit une moyenne journalière de 3,2 mm jour⁻¹. Lors de la saison sèche, l'ETR moyenne de la plantation et de la savane est respectivement de 183 et 121,5 mm (1,5 et 1 mm jour⁻¹).

La validité des mesures d'ETR dépend du choix des stations qui doivent répondre aux exigences de l'application de l'équation de Penman-Monteith : un couvert dense et homogène d'une surface supérieure à 10 000 m². La difficulté réside dans la possibilité de transferts horizontaux d'énergie, ce qu'a observé Sharma (1984) pour des plantations d'*Eucalyptus marginata* et *Eucalyptus calophylla* à l'ouest de l'Australie (avec $P_i=1100$ mm an⁻¹), pour lesquelles l'ETR a été supérieure à l'ETP à cause de transferts horizontaux d'énergie. Nous n'avons pas observé ce type de phénomène et enregistrons une très bonne corrélation entre l'ETR mesurée via l'équation de Penman-Monteith, celle obtenue par la méthode du bilan hydrique et celle provenant du rapport de Bowen (Nizinski *et al.* 2002).

L'évolution sur trois ans de la teneur en eau du sol en fonction de la profondeur (profils hydriques du sol) pour la plantation et la savane a permis de délimiter leur zone racinaire : la totalité de l'eau absorbée par ces deux écosystèmes provient des cinq premiers mètres de profondeur pour la plantation et des trois premiers mètres pour la savane. L'analyse des profils hydriques de la plantation rejoint les résultats des mesures de flux de sève effectuées dans la plantation d'Eucalyptus lors de la saison sèche de 1997: les arbres subissant un stress hydrique important (par exemple $T=0,8$ mm jour⁻¹, $ETP=3,1$ mm jour⁻¹ et $T/ETP=0,26$) ne prélèvent pas d'eau en deçà de cinq mètres de profondeur. Cette délimitation de la zone racinaire a une importance capitale dans la méthode employée et dans la précision

d'appréciation de la quantité d'eau disponible pour chacun des deux écosystèmes. Dans la savane (tableau 2), il y a **drainage** en dehors de la zone racinaire lors des saisons des pluies 1997-98 et 1998-99. Si on cumule le drainage sur les trois années étudiées (0, 390 et 438 mm), on obtient un total de 827 mm. Dans la plantation (tableau 2), on retrouve les mêmes variations mais le drainage hors de la zone racinaire est moindre (0, 207 et 263 mm sur les trois années étudiées, soit un cumul de 470 mm). Lors de la saison des pluies 1996-97, il n'y a de drainage ni dans la plantation ni dans la savane; lors des saisons des pluies 1997-98 et 1998-99, le drainage dans la savane fut supérieur à celui de la plantation de respectivement 183 et 174 mm. Ces valeurs sont proches de celles obtenues en Afrique du Sud par Van Lill *et al.* (1980) pour des bassins versants qui étaient à l'origine couverts de savanes puis furent plantés d'Eucalyptus (zone avec précipitations incidentes annuelles de 1150 mm an⁻¹) : le boisement avec *Eucalyptus grandis* a réduit le ruissellement vers les cours d'eau de 340 mm cumulés sur trois ans ; ce ruissellement provenait du drainage, le boisement ayant donc réduit le drainage hors de la zone racinaire.

3.4. DURABILITE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS

Chacun des deux écosystèmes ayant une ETR qui lui est propre, pour l'impact des Pi sur le bilan hydrique de ces deux écosystèmes, nous avons conçu la notion d'année déficitaire théorique. Si on compare l'ETR et le drainage de la plantation et de la savane en valeurs cumulées sur les trois années étudiées, l'ETR de la plantation est supérieure de 688 mm à celle de la savane et le drainage de la plantation est inférieur de 306 mm à celui de la savane : les plantations d'Eucalyptus pouvant être considérées comme d'anciennes savanes, le boisement de la savane avec des Eucalyptus augmente l'ETR et réduit le drainage. L'année déficitaire théorique, à savoir une année pour laquelle les précipitations incidentes de l'année (Pi) sont inférieures à l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle, sont calculée sur les trois années étudiées (respectivement $ETR_{96-99}=1127$ mm an⁻¹ pour la plantation et $ETR_{96-99}=821$ mm an⁻¹ pour la savane).

Sur une période de quarante neuf ans (1949-98), le nombre d'années déficitaires théoriques est de dix-sept pour la plantation et de trois (1958, 1978 et 1989) pour la savane. Mais, si on considère maintenant la variable du « nombre d'années déficitaires théoriques successives », ce phénomène a eu lieu une fois pour la plantation pendant quatre années successives (1971 à 1974) mais aucune fois pour la savane. Lors de la saison des pluies 1996-97, année particulièrement déficitaire ($Pi_{96-97}=459$ mm, soit 44% de Pi_{50-98}) et considérée comme une année déficitaire théorique, la plantation a évapotranspiré 740 mm. Cette hauteur d'eau correspond à la totalité des précipitations incidentes tombées lors de cette saison des pluies ($Pi_{96-97}=459$ mm), à laquelle il faut ajouter 281 mm d'eau qui ont donc été prélevés dans la zone racinaire (de 5 m de profondeur), desséchant ainsi la zone racinaire vers la fin de la saison sèche 1997 (septembre) jusqu'au point de flétrissement permanent (52% de la réserve totale). L'analyse des profils hydriques rend bien compte de ces phénomènes. Dans le même temps, la savane a évapotranspiré 473 mm, ce qui correspond à seulement 14 mm prélevés dans la zone racinaire, à opposer aux 281 mm prélevés dans le cas de la plantation. A la fin de la saison sèche, le sol est au point de flétrissement permanent dans la plantation alors que dans la savane, il subsiste dans le sol une quantité d'eau qui représente 15% de R_{RU} , soit 27 mm (pour une zone racinaire de 3 m de profondeur). La plantation d'Eucalyptus est un écosystème artificiel qui absorbe/transpire toute l'année et qui consomme toute l'eau disponible. La succession de plusieurs années déficitaires se traduit par l'épuisement de la réserve en eau disponible dans le sol, épuisement dont on peut supposer qu'il entraîne une réduction de la production de bois de la plantation. Dans le cas de la savane, sachant qu'il subsiste 27 mm d'eau dans le sol à la fin de la saison sèche 1996-97, on peut imaginer le scénario d'autres années déficitaires succédant à une année du type 1996-97: les 27 mm seraient alors utilisés

sans incidence sur la production de la savane. Sachant qu'entre 1950 et 1998, il n'y a eu qu'un seul épisode de quatre années déficitaires successives pour la plantation dans le bassin du Kouilou, et que la durée de rotation d'une plantation est de sept ans, on peut supposer que ce type d'épisode « sec » ne compromet pas la survie des plantations, mais qu'il ne fait que réduire leur production. Dans le cas de la savane, il n'y a pas eu ce type d'épisode « sec » : la savane est l'écosystème naturel adapté au climat du Bas-Congo, caractérisé par une variabilité interannuelle des précipitations incidentes importante; ces conditions climatiques ont sélectionné un écosystème dont l'ETR est faible, plus faible que l'ETR d'une plantation d'Eucalyptus. L'aire de distribution naturelle du genre *Eucalyptus* s'étend entre 7° de latitude nord et 43°39' de latitude sud (Sadanandan et Brown, 1997) : on peut classer les *Eucalyptus* en deux grands groupes, l'un « économe en eau » et l'autre « grand consommateur en eau ». Les clones étudiés *Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna* appartiennent au second groupe et proviennent d'un hybride introduit de Java (zone tropicale humide avec des précipitations incidentes moyennes annuelles de 2030 mm an⁻¹), à croissance rapide dont les feuilles ont une durée de vie courte (environ de 6-9 mois) et une régulation stomatique « peu marquée » ($r_{smin}=3,5$ à $5,9$ m s⁻¹ en saison des pluies). La durée de vie des feuilles des *Eucalyptus* de la station est d'environ 6-9 mois (Nizinski *et al.* 2002) et les résistances stomatiques minimales observées situent le peuplement étudié comme appartenant au groupe « grands consommateurs en eau ». Or, le climat du Bas-Congo est caractérisé par une variabilité inter-annuelle des précipitations incidentes importante (de $Pi58=296,0$ mm an⁻¹ à $Pi60=2045,3$ mm an⁻¹). L'eau est un facteur limitant pour ces deux clones, néanmoins bien acclimatés au climat régional. On peut illustrer cette acclimatation par l'utilisation de l'hydromasse en saison sèche : les forestiers ont suivi l'accroissement de bois dans le massif d'*Eucalyptus* étudié à l'aide de colliers fixés sur les troncs d'arbres à 1,30 mètre du sol de 1992 à 1998, période pendant laquelle il n'y a qu'une année déficitaire (1996-97). Sur cette durée de sept ans, ils n'ont pas observé de diminution significative de la production de bois lors des saisons sèches. Si des capteurs plus fins (capteurs de déplacement) avaient été utilisés, nous aurions peut-être pu observer l'utilisation de l'hydromasse lors de ces saisons sèches (pour un peuplement de 24 m, l'hydromasse est d'environ 20 à 30 mm selon Granier, 1987). Si on « étale » ces 30 mm sur la saison sèche (juillet et d'août), on obtient une valeur de 0,5 mm jour⁻¹ à ajouter au flux de sève (mesuré à 1,30 m du sol) qui s'élève à 0,5 mm jour⁻¹ (valeur moyenne du 24 mai au 1 août 1997). Il est alors possible d'estimer une transpiration journalière d'environ 1 mm jour⁻¹. Pour une ETP proche de 2 mm jour⁻¹ (saison sèche 1997), le rapport T/ETP serait alors de 0,5, situation proche du rapport optimum (T/ETP=0,79) et de la résistance stomatique minimale. L'utilisation de l'hydromasse en saison sèche évite donc ou modère, selon les années, la chute de production en saison sèche.

4. CONCLUSION

La succession de plusieurs années déficitaires réduit la production de bois de la plantation, mais ne compromet pas sa survie compte tenu du type de rotation de ces plantations, premier élément positif pour conclure à la durabilité de ces plantations. Le boisement de la savane avec des plantations d'*Eucalyptus* réduit le drainage, la teneur en eau du sol des plantations étant globalement toujours inférieure à celle du sol de la savane. A long terme, cette faible teneur en eau induit-elle une modification des caractéristiques chimiques et biologiques du sol ? Une étude des sols et des bilans carboné et minéral des deux écosystèmes reste à faire pour déterminer ces aspects de la durabilité de ces plantations. Le boisement de la savane avec des plantations d'*Eucalyptus* augmente l'ETR. A long terme, y aura-t-il modification du climat local ou régional ? L'étude est à entreprendre dès maintenant pour déterminer cet autre aspect de la durabilité des plantations.

Les peuplements actuels dans le bassin du Kouilou couvrent 43 000 ha, les prévisions pour 2015 sont de 100 000 ha. Des études simultanées de la croissance et de la transpiration devront permettre de sélectionner les clones favorisant des plantations durables. Sachant que l'eau est un facteur limitant de la production de bois des clones actuels, il faudrait étudier les réponses à l'alimentation en eau des clones choisis pour les futures plantations pour comparer (1) leur vitesse de croissance pour des conditions données d'alimentation en eau, (2) leur efficacité d'utilisation de l'eau, à savoir la quantité de matière sèche produite par unité de volume d'eau consommé, quelle que soit leur vitesse de croissance et, pour finalement sélectionner l'une ou l'autre de ces caractéristiques. Si on suppose qu'une ETR élevée modifiera le climat régional à long terme, les clones à l'origine de plantations durables ne devront pas nécessairement être les plus productifs en bois.

Remerciements : Cette étude a été financée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Les auteurs remercient Jean-Baptiste Diazenza, pour son aide sur le terrain.

5. BIBLIOGRAPHIE

BEADLE C. L., NEILSON R. E., TALBOT R. E. et JARVIS P. G., 1995 : Stomata conductance and photosynthesis in a mature Scots pine forest. I. Diurnal, seasonal and spatial variation in shoots. *Journal of Applied Ecology*, **22**, 557-571.

BOUILLET J.-P., LACLAU J.-P., NIZINSKI J. et NZILA J. D., 1999 : La Fertilité des sols sous Eucalyptus : Impact des plantations autour de Pointe Noire (Congo). *Le Flamboyant*, **49** (3), 26-28.

CALDER I. R., 1986 : Water use of Eucalyptus – a review with special reference to South India. *Agricultural Water Management*, **11**, 333-342.

DYE P. J., 1987 : Estimating water use by Eucalyptus grandis with the Penman-Monteith equation. *Forest Hydrology and Watershed Management*, **167**, 329-337.

GAZARINI L. C., ARAUJO M. C. C., BORRAHLO N. et PEREIRA J. S., 1990 : Plant area index in *Eucalyptus globulus* plantations determined indirectly by light interception method. *Tree Physiology*, **7**, 107-113.

GEORGE M., 1978 : Interception, stemflow and throughfall in a Eucalyptus hybrid plantation. *Indian Forestry*, **104**, 719-726.

GRANIER A., 1987 : Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap-flow measurements. *Tree Physiology*, **3**, 309-320.

HONEYSETT J. L., WHITE D. W., WORLEDGE D. et BEADLE C. L., 1996 : Growth and water use of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in irrigated and rainfed plantations. *Australian Forestry*, **59**, 64-73.

LACLAU J.-P., BOUILLET J.P. et RANGER J., 2000 : La Fertilité des sols sous Eucalyptus : impact des plantations autour de Pointe-Noire (Congo). *Forest Ecology and Management*, **128**(3), 181-196.

MYERS B. J., THEIVEYANTHAN S., O'BRIEN N. D. et BOND W. J., 1996 : Growth and water use of effluent-irrigated *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* plantations. *Tree Physiology*, **16**, 211-219.

NIZINSKI J.-J., LOUMETO J.-J., AYOMA M.-B., MABIALA-N'GOMA A. et NSEMI R. N., 2002 : Evapotranspiration réelle de la plantation d'Eucalyptus (bassin du Kouilou, Congo). *Annales de l'Université de Marien Ngouabi (Brazzaville)*, **3**, 10-24.

PENMAN H. L., 1948 : Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.*, **193**, 120-145.

PINKER R. T., THOMPSON O. E. et ECK T. F., 1980 : The albedo of tropical evergreen forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **106**, 551-558.

RIOU C., 1975 : *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale*. ORSTOM, Paris, 236 pages.

ROBERTS J. et ROSIER P. T. W., 1993 : Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and derived estimates of forest transpiration. *Agricultural Water Management*, **24**, 103-118.

ROBERTS J. M., ROSIER P. T. W. et MURTHY K. V. S., 1992 : *Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and their use in estimating forest transpiration*. In: Calder I.R., Hall R.L., Adlard P.G. (éditeurs), 'Growth and Water Use of Forest Plantations', Wiley, 226-243.

SADANANDAN N. E. K. et BROWN A. G., 1997 : *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. ACIAR Monograph n°43, 571 pages.

SHARMA M. L., 1984 : Evapotranspiration from a Eucalyptus community. *Agricultural Water Management*, **8**, 41-56.

SMITH M. K., 1974 : Throughfall, stemflow, and interception in pine and eucalypt forest. *Australian Forestry*, **36**, 190-197.

STEWART J. B., 1988 : Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **43**, 19-37.

VAN LILL W. S., KRUGER F. J. et VAN WYK D. B., 1980 : The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *Journal of Hydrology*, **48**, 107-118.

VENNETIER P., 1968 : *Pointe-Noire et façade maritime du Congo-Brazzaville*. Mémoires ORSTOM n°26, ORSTOM, Paris, 458 pages.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONNEMENT AND DEVELOPMENT, 1987 : Our common future. Oxford University Press, 323 pages

15. ÉTUDE ET MODELISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX : CAS D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION

Résumé. - Dans les modèles climatiques globaux, le fonctionnement de la circulation générale de l'atmosphère est intimement lié à la distribution planétaire des sources et des puits d'énergie ; lors des équilibres, le transport de l'énergie s'effectue par l'air atmosphérique et l'eau des océans. L'atmosphère doit ainsi transporter de l'énergie des continents vers les océans pendant l'été et des océans vers les continents pendant l'hiver.

L'étude de ces phénomènes sur les continents utilise les données relatives aux études d'évapotranspiration réelle à un niveau local, niveau qui est présenté ici. Les modèles récents d'évapotranspiration d'un couvert dissocient évaporation du sol, transpiration du végétal et interception, simulent l'évolution de la structure du couvert, des résistances stomatiques, facteurs qui contrôlent les résistances au transfert de vapeur d'eau et qui régissent l'équilibre entre évaporation et transpiration.

Aujourd'hui pour les modèles à vocation mécaniste, se pose le problème du choix des paramètres d'entrée les plus significatifs et le problème de leur calage initial dans des conditions environnementales données. L'objectif de ce travail est de présenter l'intérêt de l'utilisation de la formule de Penman-Monteith ; ce modèle permet de bien rendre compte de l'évapotranspiration de couverts végétaux fermés (plantation) et peut être adapté à des couverts non fermés (savane herbacée boisée avec surfaces de sol nu) en traitant séparément transpiration des feuilles et évaporation du sol nu.

L'évapotranspiration des savanes herbeuses diffère de celle des plantations parce qu'elle est limitée par une résistance de couche limite qui est du même ordre de grandeur que la résistance du couvert liée aux stomates et à l'indice foliaire, alors que l'évapotranspiration des plantations est limitée seulement par la résistance du couvert: les arbres ont des stomates plus sensibles au dessèchement de l'air et du sol que les stomates des plantes herbacées.

Mots-clés : Modélisation, Equation Penman-Monteith, Evapotranspiration, Résistance du couvert.

INTRODUCTION

Pour les modèles de l'évapotranspiration des couverts végétaux à vocation mécaniste, se pose le problème (a) du choix des paramètres d'entrée les plus significatifs ; et (b) le problème de leur calage initial dans des conditions environnementales données (Perrier, 1976). L'objectif de ce travail est de présenter l'intérêt de l'utilisation de la formule de Penman-Monteith (Monteith & Unsworth, 1990); ce modèle permet de bien rendre compte de l'évapotranspiration de couverts végétaux fermés (plantation) et peut être adapté à des couverts non fermés (savane herbacée boisée avec surfaces de sol nu) en traitant séparément transpiration des feuilles et évaporation du sol nu.

L'évapotranspiration des savanes herbeuses diffère de celle des plantations parce qu'elle est limitée par une résistance de couche limite qui est du même ordre de grandeur que la résistance du couvert liée aux stomates et à l'indice foliaire, alors que l'évapotranspiration des plantations est limitée seulement par la résistance du couvert: les arbres ont des stomates plus sensibles au dessèchement de l'air et du sol que les stomates des plantes herbacées.

Dans cet article, pour l'estimation et la modélisation de l'évapotranspiration, l'échelle de temps choisie, est la journée ; les conditions sont celles dites du « flux conservatif » pour lesquelles l'absorption est égale à la transpiration, ce qui est rarement le cas dans la réalité pour une échelle de temps inférieure à la journée, au cours de laquelle il y a déshydratation et

réhydratation de la plante, mais ce qui est réaliste pour un pas de temps de 24 heures. Historiquement Penman (1948) puis Monteith (1965) ont posé les bases physiques du calcul de l'évaporation d'une surface mouillée puis de l'évapotranspiration d'un couvert végétal fermé.

THEORIE DES MESURES DE L'EVAPOTRANSPIRATION

L'équation dite de Penman associe la méthode du profil aérodynamique et celle du bilan d'énergie, en supposant de coefficients de transfert turbulent d'énergie et de masse identiques ($k_H \approx k_E$). En associant les deux équations pour éliminer la température de surface, difficile à mesurer, on obtient l'équation de Penman:

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

Avec: E_p -évapotranspiration potentielle, en mm jour⁻¹; Δ -dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en kPa °C⁻¹ ($\Delta = e_{s(t)} - e_{s(th)} / t - th$); avec: $e_{s(t)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface t, en kPa; $e_{s(th)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface humide th, en kPa; t-température de l'air, en °C; t_h -température humide de l'air, en °C); R_n -rayonnement net ou effectif, en W m⁻²;

$$R_n = R_g(1-g) + (R_a - R_t) \quad \text{et} \quad R_n = H + \lambda E + G_s$$

Avec: R_g -rayonnement solaire global, en W m⁻²; R_a -rayonnement atmosphérique, en W m⁻²; R_t -rayonnement terrestre, en W m⁻²; g-réfectivité de la surface (fraction du rayonnement réfléchi pour une longueur spécifique); H-flux de chaleur sensible, en W m⁻²; λE -flux de chaleur latente d'évaporation, en W m⁻²; G_s -flux de chaleur dans le sol, en W m⁻²; λ -chaleur latente de vaporisation, en J kg⁻¹ (2451,8 J g⁻¹); γ -constante psychrométrique, en kPa °C⁻¹

$$\gamma = c_p P / \lambda (M_{EAU} / M_{AIR})$$

Avec: c_p -chaleur massique de l'air, en J kg⁻¹ (1,012 J kg⁻¹); P-pression atmosphérique, en kPa; M_{EAU} -masse molaire de l'eau, en kg mole⁻¹ (18,10⁻³ kg mole⁻¹); M_{AIR} -masse molaire de l'air, en kg mole⁻¹ (29,10⁻³ kg mole⁻¹); E_a -évaporation d'une surface dont la température serait celle de l'air, mesurée sous abri, en mm jour⁻¹;

$$E_a = 2,6 (e_{s(t)} - e_{a(t)}) (1 + 0,537 u_{2M})$$

ou: $e_{s(t)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface t, kPa; u_{2M} -vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en m s⁻¹.

Pour les surfaces présentant une très petite pente, uniformes et suffisamment étendues, les flux de chaleur sensible et de chaleur latente sont considérés comme verticaux et on applique le principe de « similarité » entre les coefficients de transfert de chaleur sensible (k_H) et de chaleur latente (k_E), ainsi: $k_H \approx k_E$. Les relations empiriques entre flux et gradients verticaux des chaleurs sensible et latente peuvent s'écrire:

Equation dite de Penman-Monteith (1965):

$$Ea = \frac{Ep}{\left(1 + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma}\right) \cdot \left(\frac{rst}{LAI \cdot ra}\right)\right)}$$

Avec: Ea –évapotranspiration réelle, en mm jour⁻¹; Ep –évapotranspiration potentielle, en mm jour⁻¹; r_{st} –résistance stomatique d’une feuille, en s cm⁻¹; LAI–indice foliaire du couvert, sans unité; r_a –résistance aérodynamique du couvert, en s cm⁻¹.

LA RESISTANCE DE COUCHE LIMITE

Cette équation suppose de quantifier la **résistance aérodynamique** du couvert (r_a), la **résistance de surface du couvert** (dite résistance du couvert)(r_c) et les variables climatiques. La résistance aérodynamique est une grandeur physique qui rend compte de la diffusion de chaleur ou de vapeur d’eau de la surface des feuilles vers l’atmosphère.

La résistance du couvert (r_c) comporte en plus un terme biologique qui rend compte de la diffusion de la vapeur d’eau issue des feuilles, la résistance stomatique des feuilles à la diffusion de la vapeur d’eau, r_{st} . On utilise pour des couverts fermés les équations simplifiées suivantes:

$$ra = \frac{rb}{LAI} + ra(1)$$

et

$$rc = \frac{rb + rst}{LAI} + ra(1)$$

Avec: r_b –résistance de couche limite de la feuille; LAI–indice foliaire; $r_{a(1)}$ –résistance aérodynamique entre le milieu du couvert et la hauteur de mesure; r_{st} –résistance stomatique de la feuille à la diffusion de vapeur d’eau

Ces équations supposent que les résistances des feuilles de l’ensemble du couvert sont identiques à tout instant, or ce n’est pas le cas: du haut vers le bas du couvert il y a augmentation de r_b due à diminution de la vitesse du vent; il y a augmentation de r_{st} due à la diminution de l’éclairement; par ailleurs les conditions de croissance des feuilles dépendant de leur position dans l’architecture du couvert, les feuilles de haut et du bas du couvert n’ont pas les mêmes caractéristiques physiologiques (feuilles dites « d’ombre » et « de lumière »).

LA RESISTANCE AERODYNAMIQUE

La résistance aérodynamique est composée des résistances à la diffusion de la chaleur ou de la vapeur d’eau de la couche limite des feuilles et de la résistance de l’air entre le milieu du couvert (moyenne de la hauteur de ce couvert) et la hauteur au dessus du couvert où techniquement il est possible de mesurer les variables météorologiques. On évalue r_a ou son inverse $1/r_a = g_a$, conductance aérodynamique, en supposant l’égalité entre transport de chaleur (k_H) et transport de quantité de mouvement (k_V):

$$ra = \left(\frac{1}{(k2 \cdot u2m)}\right) \cdot \left[\ln\left(\frac{z-d}{z0}\right)\right]^2$$

Avec: r_a -résistance aérodynamique, en $s\ cm^{-1}$; k -constante de von Karman (0,39); u_{2M} -vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en $m\ s^{-1}$; z -niveau considéré, en m; z_0 -longueur de rugosité, en m; d -hauteur du déplacement, en m.

Pour les savanes (steppe sahélienne et savane du littoral congolais), nous avons estimé g_a à partir des profils de la vitesse du vent au dessus de ces couverts herbacés (de $2,5\ cm\ s^{-1}$ à $5,0\ cm\ s^{-1}$); pour les couverts arborescents (chênaie, plantation d'Eucalyptus et d'hévéa) nous avons calculé g_a à partir de la hauteur du peuplement :

$$d=0,75\ h\ \text{et}\ z_0=0,1\ h$$

Avec: d -hauteur de déplacement, en m; z_0 -longueur de rugosité, en m; h -hauteur du peuplement, en m (de $5,0\ cm\ s^{-1}$ à $10,0\ cm\ s^{-1}$).

L'ensemble des valeurs de la résistance aérodynamique rendent compte du fait que la résistance diminue avec la rugosité du couvert et avec la vitesse du vent.

Pour les couverts épars, le calcul de la résistance aérodynamique n'a pour l'instant pas de solution théorique; pour la steppe sahélienne composée à 80 % de zones herbacées (bosquets d'arbres peu denses) nous avons supposé l'égalité des résistances aérodynamiques entre zones herbacées et bosquets, ce qui, compte tenu de la faible densité des arbres au sein des bosquets reste raisonnable: la résistance est d'autant plus élevée que la densité est faible; par ailleurs, en ce qui concerne l'estimation de l'interception (seule la résistance aérodynamique intervient), on peut supposer qu'on ne la surestime pas trop car les pluies sont de grande intensité et la capacité de rétention des couronnes et troncs est faible ($2,9-3,8\ mm$ pour *Balanites aegyptiaca* et *Acacia raddiana*).

Les valeurs maximales de l'interception des bosquets de *B. aegyptiaca* et d'*A. raddiana* sont de 8,4 et 12,4 % des précipitations incidentes alors qu'elles peuvent atteindre 40 % des précipitations incidentes (P_i) pour le chêne en zone tempérée (forêt de Fontainebleau); les valeurs maximales de l'interception des bosquets (8,4 et 12,4 % P_i) sont du même ordre de grandeur que celle des zones herbacées de la savane sahélienne (7,5 % de P_i) et de la savane du littoral congolais (7 % de P_i).

LA RESISTANCE DU COUVERT

La résistance du couvert dépend des résistances stomatiques des feuilles de ce couvert et de l'indice foliaire; la transpiration du couvert est la somme des transpirations de l'ensemble des feuilles, chaque feuille ayant une résistance stomatique donnée instantanée dépendante de ses caractéristiques physiologiques propres et du microclimat auquel elle est soumise.

La résistance stomatique: les mouvements stomatiques (dépendant de la turgescence des cellules de garde) sont sous le contrôle du rayonnement incident, de l'état hydrique de l'air, de l'état hydrique du sol et de l'état hydrique des feuilles.

Les mécanismes par lesquels les stomates répondent aux trois derniers facteurs sont encore discutés:

- concernant l'état hydrique de l'atmosphère, il devient de plus en plus discuté que les stomates soient dépendants de l'humidité relative de l'air. Ils seraient dépendants du

déficit de saturation de l'air associé au flux d'eau à l'intérieur de la feuille, mais on ignore par quels mécanismes.

- concernant l'état hydrique du sol, on a longtemps expliqué l'action de ce dernier sur les mouvements stomatiques par son action sur l'état hydrique des feuilles: ainsi une baisse du potentiel hydrique du sol entraînerait une baisse du potentiel hydrique des feuilles qui entraînerait à partir d'un potentiel seuil une fermeture des stomates, mais on sait aujourd'hui qu'une plante bien alimentée en eau mais soumise à des potentiels hydriques du sol élevés (artifice expérimental) fermera ses stomates: les racines, au contact d'un sol desséché, synthétiseraient de l'acide abscissique qui agirait directement sur les stomates, quel que soit l'état hydrique de la plante. Parmi les espèces que j'ai étudiées, *B. aegyptiaca* pourrait répondre à ce cas de figure: En période de dessèchement du sol, avec des horizons supérieurs du sol n'offrant plus d'eau disponible pour la plante et avec des horizons plus profonds ayant encore de l'eau disponible, *B. aegyptiaca* fermera ses stomates (en fonction des journées, même en fin de nuit – lever du soleil, il peut ne pas y avoir ouverture stomatique).
- concernant l'état hydrique de la plante, il n'existe pas de relation causale simple entre les mouvements stomatiques et le potentiel hydrique foliaire: ainsi à potentiel hydrique foliaire égal les stomates sont fermés la nuit et ouverts le jour; en fonction de l'espèce, le dessèchement du sol provoque une fermeture stomatique, avec ou non incidence sur le potentiel hydrique foliaire. Les espèces sur lesquelles nous avons travaillé répondent au 1^{er} cas de figure à l'exception de *B. aegyptiaca*. Lors d'une période de dessèchement du sol *B. aegyptiaca* a une stratégie de modification de l'indice foliaire (chute des feuilles) associée au maintien d'un potentiel hydrique foliaire élevé pour les feuilles restantes (pendant une période dépendante de la période de sécheresse). Parmi les régulations d'une plante soumise à la sécheresse, il y a celles relatives au flux d'eau dans la plante et celles relatives à la distribution des assimilats, en général une part plus importante du carbone est destinée aux racines et/ou il y a réduction de la croissance foliaire et accélération de la sénescence.

La résistance stomatique est généralement systématiquement mesurée sur le terrain – ce que nous avons fait - mais actuellement on ne dispose que de modèles empiriques pour rendre compte des variations de cette résistance avec les facteurs du milieu. La résistance stomatique d'une feuille peut être calculée à l'aide des modèles empiriques de Jarvis (1976) à partir des relations entre la résistance stomatique minimale d'une feuille, le potentiel hydrique des feuilles, le rayonnement global, le déficit de saturation de l'air et la réserve en eau du sol.

LA RESISTANCE DU COUVERT

La résistance stomatique dépend de la **résistance stomatique minimale**, valeur remarquable correspondant à une situation de non contrainte hydrique (sol et plante) (Nizinski, 2007). La résistance stomatique minimale évolue dans le temps, de l'apparition de la feuille jusqu'à sa mort, elle décroît jusqu'à une valeur minimale pour ensuite réaugmenter (évolution biologique et physiologique de la feuille), ce que nous avons observé sur les espèces que nous avons étudiées. Chez les espèces caducifoliées (chêne, *Acacia*, hévée) toutes les feuilles du couvert évoluant *grosso modo* de façon synchrone, la résistance du couvert est une fonction de la résistance stomatique minimale et de l'indice foliaire.

Chez les espèces persistantes (*Eucalyptus*), le degré de dépendance de la résistance du couvert à la résistance stomatique minimale dépendra du taux du renouvellement des feuilles puisque coexistent dans le couvert des feuilles d'âges différents (problématique d'échantillonnage).

Relation [résistance stomatique minimale - indice foliaire] chez les espèces caducifoliées: à l'exception d'Eucalyptus, les espèces que nous avons étudiées sont caducifoliées, la période sans feuille étant la saison froide en zone tempérée et la saison sèche en zone tropicale nous avons pu ainsi analyser les phénomènes suivants: lors de la mise en place du couvert la résistance stomatique minimale d'une feuille décroît avec l'augmentation de l'indice foliaire et continue généralement de décroître jusqu'à sa valeur minimale alors que l'indice foliaire est maximal. La période (LAI_{max} - valeurs minimale de r_{st-min} : chez *Q. petraea* - $LAI=100\%$; $r_{st}=3,6\pm 0,9\text{ s cm}^{-1}$; $LAI=8\%$; $r_{st}=8,7\pm 3,6\text{ s cm}^{-1}$) (Nizinski et Saugier, 1989) est plus ou moins longue en fonction de l'espèce; par exemple chez le chêne, elle est très courte (deux à trois semaines). Ensuite, la r_{st-min} réaugmente pendant toute la période du LAI_{max} (deux mois et demi pour le chêne) pour continuer d'augmenter lors de la sénescence (Nizinski & Saugier, 1988).

Pour estimer la **résistance du couvert**, on a commencé historiquement par supposer que toutes les feuilles étaient semblables (mêmes caractéristiques physiologiques, même microclimat)

- Katerji & Perrier (1985) ont estimé la variabilité des résistances stomatiques dans l'ensemble du couvert et divisent le couvert en plusieurs strates auxquelles ils appliquent l'équation citée plus haut.
- Saugier & Katerji (1991) proposent un calcul reposant sur la décroissance exponentielle du rayonnement avec l'indice foliaire cumulé à partir du sommet du couvert et sur l'intégration de la variation de la résistance stomatique avec le rayonnement reçu.
- D'autres auteurs calculent la résistance du couvert r_c , à partir de mesures du flux de chaleur latente au dessus du couvert par des méthodes micrométéorologiques en inversant l'équation de Penman-Monteith, le couvert végétal fermé est assimilé à une « grande feuille » dont il faut connaître la résistance aérodynamique:

Nous avons commencé par utiliser le modèle de Jarvis (1976) puis pour la savane du littoral congolais, l'équation inversée de Penman-Monteith, avec en parallèle des mesures de résistance stomatique et des facteurs du milieu (Nizinski *et al.*, 2009); cette dernière approche permet de faire une analyse déterministe de la résistance du couvert: la mesure de l'indice foliaire s'avère déterminante dans l'estimation de cette résistance.

LES VARIABLES CLIMATIQUES

Autres variables difficiles à estimer dans l'équation Penman-Monteith le déficit de saturation de l'air. Il doit théoriquement et idéalement être mesuré au dessus de la végétation dans la couche de l'atmosphère constamment modifiée par l'évapotranspiration (couche limite de surface) et diffère alors des valeurs des stations météorologiques (gazon bien arrosé).

Pour exemple, la « couche limite de surface » de la savane congolaise est $Z_H \approx 3,0$ x hauteur du peuplement dans le cas du flux de chaleur sensible, et $Z_{\lambda E} \approx 3,5$ x hauteur du peuplement dans le cas du flux de chaleur latente. Méthodologiquement, il faut éviter tout effet de « fetch » pour que les formules aérodynamiques classiques puissent y être appliquées (Perrier, 1976).

Il existe des modèles pour estimer le déficit de saturation de l'air à partir des caractéristiques de la couche limite planétaire, couche globale soumise aux échanges d'énergie et de masse de la surface mais non encore soumise à la rotation terrestre (de quelques dizaines de mètres la nuit et jusqu'à 3000 mètre le jour).

INFLUENCE DE L'INDICE FOLIAIRE DU COUVERT SUR L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE

Le rapport Transpiration/Evapotranspiration potentielle augmente avec l'augmentation de l'indice foliaire suivant une fonction $1 - e^{-k \text{ LAI}}$ où k représente le coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert (Saugier, 1996).

En fonction du type de végétation l'écart à cette courbe est plus ou moins grand. L'estimation et la modélisation de l'indice foliaire sont donc essentielles. Nous illustrerons l'influence de l'indice foliaire sur l'évapotranspiration réelle à partir de deux situations: la chênaie tempérée, forêt caduque que nous avons suivie plusieurs années du débourrement jusqu'à la chute des feuilles, et la steppe sahélienne, végétation hétérogène.

Dans le cas *des espèces caducifoliées*, il s'agit de modéliser les différents événements phénologiques: le jour de débourrement, la période de croissance foliaire jusqu'à indice foliaire maximal, la phase adulte pendant laquelle l'indice foliaire $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$, le début de la sénescence, de la chute des feuilles jusqu'à moment où l'indice foliaire s'annule. Avec deux variables d'entrée simples, la température moyenne de l'air et la photopériode, nous avons modélisé pour *Q. petraea*, le jour du débourrement, celui de la fin d'accroissement en surface des feuilles, l'évolution de l'indice foliaire.

L'évapotranspiration réelle suit les variations de l'indice foliaire dans les forêts caduques; comme il existe un décalage entre le moment où $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$ et le moment où $r_{\text{st-min}}$ atteint sa valeur minimale, l'évapotranspiration réelle atteint son maximum (en période de non contrainte hydrique) après $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$ au moment où $r_{\text{st-min}}$ est à sa valeur minimale pour le chêne environ un mois après que $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$. *B. aegyptiaca* offre un exemple d'adaptation à la sécheresse et nous allons récapituler ici ensemble de ses caractéristiques qui expliqueraient sa répartition (espèce qui « remonte » le plus au Nord du Sénégal) et l'augmentation actuelle de sa fréquence par rapport aux autres espèces arbustives et arborescentes de la steppe sahélienne: en saison sèche, lorsque la disponibilité en eau devient limitante, on a vu que *B. aegyptiaca* avait une stratégie de maintien d'un potentiel foliaire élevé avec augmentation de la résistance stomatique (« message d'ABA » issu des racines) et une stratégie de modification de l'indice foliaire (chute des feuilles). Ainsi, en fin de saison sèche alors que *B. aegyptiaca* n'a plus des feuilles il subsiste dans les horizons profondes (au-delà de 2,0 m de profondeur) une lame d'eau qui était disponible pour *B. aegyptiaca* mais qui n'a pas été utilisée (augmentation de la résistance stomatique, diminution de la transpiration).

Ensuite, il y a débourrement et croissance foliaire avant les pluies, pendant la période où l'humidité relative de l'air réaugmente, cette croissance foliaire est possible puisqu'il y a de l'eau disponible en profondeur.

Une telle situation nous amène à faire deux suppositions:

(1^e) supposons l'existence d'un « message » chimique lié à la détection de l'augmentation de l'humidité relative de l'air, message participant à l'équilibre chimique de l'induction au débourrement. Cette détection doit être le fait d'un organe aérien qui pourrait être les tiges (épines) photosynthétiques, qui elles, restent en place ;

(2^e) supposons que ce message est prioritaire par rapport au « message ABA » issu des racines puisque les feuilles se mettent en place alors que la réserve en eau des horizons supérieurs sont à la réserve au point de flétrissement permanent, dans une « configuration sol » identique

à celle de la fin de la saison sèche. On peut se poser la question de l'avantage adaptatif de la mise en place des feuilles avant l'arrivée des pluies.

L'INCIDENCE DE LA MODIFICATION DES COUVERTS SUR L'ÉVAPOTRANSPIRATION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'homme a modifié et continue de modifier les couverts végétaux; globalement il y a une augmentation des surfaces herbacées et de sol nu au détriment des surfaces peuplées d'arbres et d'arbustes depuis le néolithique. Les modifications du couvert végétal participent à l'évolution des climats locaux, des climats régionaux et du climat global terrestre. Les modèles climatiques de circulation générale de l'atmosphère nécessitent des modèles d'évapotranspiration réelle tenant compte des échanges végétation – atmosphère les plus réalistes possibles. Notre étude au Sénégal de la steppe à *A. raddiana* et à *B. aegyptiaca* (Nizinski *et al.*, 1994) et notre étude au Congo de la savane à *Loudetia arundinacea* et des plantations d'Eucalyptus sur le littoral (Nizinski *et al.*, 2011) offrent deux exemples de l'incidence d'une modification du couvert sur l'évapotranspiration réelle: au Sénégal, les bosquets de la steppe (20 % de la surface) peuvent être assimilés à ce qu'était la forêt claire à *A. senegal* du Nord du Sénégal avant que cette forêt ne disparaisse et les 80 % de surface herbacée représentent le nouvel écosystème.

Au Congo, sur le littoral, il existe des lambeaux de savane pure jouxtant les forêts d'Eucalyptus plantées sur cette savane d'origine. Le remplacement de la forêt par un écosystème herbacé augmente le drainage et diminue l'évapotranspiration réelle sur un cycle complet de végétation (avec des variations saisonnières qui peuvent être marquées puisqu'en saison de déficit hydrique les deux écosystèmes se différencient moins qu'en saison humide où l'évaporation de l'eau interceptée est plus grande pour la forêt à cause de sa forte rugosité). La conductance de surface des deux couverts diffère peu, ce qui diffère, c'est la conductance aérodynamique pour laquelle il existe un facteur 2 entre les deux couverts (de 2,5 cm s⁻¹ à 5,0 cm s⁻¹ pour « l'herbacé » et de 5,0 cm s⁻¹ à 10,0 cm s⁻¹ pour le « forestier »). Les deux couverts se différencient par leur albédo (supérieure pour l'écosystème herbacé) et leur bilan énergétique (inférieur pour l'écosystème herbacé), l'évapotranspiration réelle d'un écosystème herbacé dépendra surtout du rayonnement net et l'évapotranspiration réelle d'une forêt du déficit de saturation de l'air.

Le sol joue un rôle d'importance majeure: l'état de surface du sol va contrôler l'existence (ou l'absence) de ruissellement dû à la présence (ou à l'absence) d'une croûte dans des écosystèmes herbacés à faible recouvrement. Dans la steppe à *A. raddiana*, la 1^{ère} année, après la mise en défens de la parcelle expérimentale, il y a eu constitution d'une croûte et non renouvellement de la strate herbacée car cette surface n'était plus piétinée par les troupeaux; la 2^e année un sarclage a remplacé le piétinement animal. La conductivité hydraulique du sol saturé va aussi contrôler l'existence (ou l'absence) d'un ruissellement; cette variable est dans l'ensemble plus faible dans les écosystèmes herbacés souvent soumis au piétinement animal que dans les forêts.

La profondeur du sol exploitée par les racines des arbres est généralement supérieure à celle exploitée par les racines des herbes: il subsiste dans le sol de la steppe à *A. raddiana* une lame d'eau disponible qui pourrait être utilisée si la steppe était boisée. Lean et Rowntree (1997) donnent un exemple de remplacement d'une forêt (forêt amazonienne) par une prairie, exemple pour lequel la diminution de la profondeur du sol exploitée n'affecte que peu le bilan hydrique: dans le cas de la forêt amazonienne, il existe des régions où le sol potentiellement exploitable par les racines est peu profond (existence d'un horizon imperméable aux racines),

on se retrouve dans le cas d'une forêt qui ne dispose que d'une faible « réserve utile » comparable à celle de la prairie qui lui succède et dont le sol présente souvent une circulation hydrique souterraine importante. On voit ici l'importance du sol dans un bilan hydrique régional.

Dans les modèles climatiques globaux, le fonctionnement de la circulation générale de l'atmosphère est intimement lié à la distribution planétaire des sources et des puits d'énergie; lors des équilibres, le transport s'effectue par l'air atmosphérique et l'eau des océans. L'atmosphère doit ainsi transporter de l'énergie des continents vers les océans pendant l'été et des océans vers les continents pendant l'hiver.

L'étude de ces phénomènes sur les continents utilise les données relatives aux études d'évapotranspiration réelle à un niveau local et régional, niveau qui est le notre. Les modèles récents d'évapotranspiration réelle d'un couvert dissocient évaporation du sol, transpiration du végétal et interception, simulent l'évolution de la structure du couvert, des résistances stomatiques, ensembles de facteurs qui contrôlent les résistances aux transferts de vapeur d'eau et qui régissent l'équilibre entre évaporation et transpiration. Aujourd'hui pour les modèles à vocation mécaniste, se pose le problème du choix des paramètres d'entrée les plus significatifs et le problème de leur calage initial dans des conditions environnementales données. Actuellement d'un point de vue méthodologique, pour les espèces arbustives/arborescentes, l'estimation de la transpiration individu par individu (flux de sève) ouvre des perspectives nouvelles.

Nous finirons en disant que parallèlement au travail de modélisation, le travail de terrain est loin d'être achevé: ainsi de la résistance stomatique minimale pour laquelle nous avons montré qu'il existait pour *Q. petraea* un facteur trois entre sa valeur minimale et sa valeur maximale ou encore de la gamme que l'on peut supposer très étendue des caractéristiques d'adaptation à la sécheresse telles que celle décrites pour *B. aegyptiaca*.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Professeurs Alain Perrier, Bernard Saugier et Pierre-Lucien Siband qui ont suivi nos travaux depuis près de 30 ans.

RÉFÉRENCES

JARVIS, P.G. (1976). - The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, Series B, 273: 593-610.

KATERJI, N. & PERRIER, A. (1985). - Détermination de la résistance globale d'un couvert végétal à la diffusion de la vapeur d'eau et de ses différentes composantes. Approche théorique et vérification expérimentale sur une culture de luzerne. *Agricultural Meteorology*, 34: 105-120.

LEAN, J. & ROWNTREE P.R. (1997). - Understanding the Sensitivity of a GCM Simulation of Amazonian Deforestation to the Specification of Vegetation and Soil Characteristics. *Journal of Climate*, 10: 1216-1235.

MONTEITH, J.L. (1965). - Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. *Symosia of the Soc. Exp. Biol.*, New York, Academic Press, 19: 205-234.

MONTEITH, J.L. & UNSWORTH, M.H. (1990). - *Principles of environmental physics*. (2nd ed.), Edward Arnold, London.

NIZINSKI, J.J. (2007). - *Etude et modélisation du bilan des échanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Orléans, Orléans.

NIZINSKI, J.J. & SAUGIER, B. (1988). - A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. *Journal of Applied Ecology*, 25: 643-652.

NIZINSKI, J.J. & SAUGIER, B. (1989). - A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 47: 1-17.

NIZINSKI, J.J., MORAND, D. & FOURNIER, CH. (1994). - Actual evapotranspiration of a thorn scrub with *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca* (North Senegal). *Agricultural and Forest Meteorology*, 69: 93-111.

NIZINSKI, J.J., GALAT-LUONG, A., GALAT, G., DINGKUH, M. & FABRE, D. (2009). - Evapotranspiration réelle et résistance du couvert d'une savane à *Loudetia arundinacea* (bassin du Kouilou, Congo-Brazzaville). *Climatologie*, 6: 33-45.

NIZINSKI, J.J., GALAT, G. & GALAT-LUONG, A. (2011). - Water balance and sustainability of Eucalyptus plantations in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). *Russian Journal of Ecology - Ekologiya*, 42: 40-50.

PENMAN, H.L. (1948). - Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 193: 120-145.

PERRIER, A. (1976). - *Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux: profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette*. Thèse d'Etat, Université de Pierre et Marie Curie, Paris VI.

SAUGIER, B. (1996). - Evapotranspiration des prairies et des cultures. *Comptes Rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 82 : 133-153.

SAUGIER, B. & KATERJI, N. (1991). - Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54: 263-277.