

DÉTERMINATION DE L'ORIGINE DE L'EAU UTILISÉE PAR LA VÉGÉTATION EN ENVIRONNEMENT SEMI-ARIDE : MODÈLES ET VALIDATION

J.P BRUNEL¹, G.R. WALKER², A.K. KENNETT-SMITH²

RÉSUMÉ

On peut utiliser les isotopes stables de l'eau, ²H et ¹⁸O pour déterminer l'origine de l'eau utilisée par la végétation en régions semi-arides. Lorsque l'on compare la composition isotopique de l'eau dans les horizons du sol à fort potentiel matriciel (et donc à disponibilité importante en eau) avec celle de l'eau circulant dans la plante, on constate que l'erreur totale sur la signature en Deutérium est de l'ordre de 5 %. Cette valeur prend en compte les erreurs liées à l'extraction de l'eau des compartiments sol et végétation, l'hétérogénéité spatiale dans les profils de sol, l'hétérogénéité au sein de la plante elle-même, les erreurs liées aux vitesses de déplacement de l'eau dans la plante et les erreurs faites éventuellement par l'hypothèse de non fractionnement isotopique de l'eau par les racines. Cette erreur globale est généralement inférieure à la variation naturelle des compositions isotopiques mesurées et permet donc leur utilisation. Cette erreur est du même ordre de grandeur pour ¹⁸O, 1 %.

Nous avons utilisé un « modèle à compartiments » pour quantifier les erreurs résultant d'une « inversion » des signatures isotopiques de l'eau provenant de deux horizons du sol. L'erreur dans l'estimation de la proportion d'eau de chaque compartiment utilisée par la végétation est de 20 %. Pour de nombreuses applications hydrologiques, c'est une erreur acceptable. C'est aussi la première étude qui tente d'estimer les erreurs inhérentes à la méthode isotopique.

¹Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France.

²CSIRO Division of Water Resources & Center for Groundwater Studies. PB 2, Glen Osmond, Adelaide, S.A., Australia.

INTRODUCTION

Connaître l'origine de l'eau transpirée par la végétation est particulièrement utile dans l'étude des bilans hydrologiques. Les isotopes stables de l'eau (deutérium et oxygène-18) contenue dans les plantes peuvent indiquer la ou les sources possibles de l'eau utilisée par ces plantes (BRUNEL *et al.*, 1991 ; EHLERINGER et DAWSON, 1992). L'hypothèse à la base de la méthode isotopique est celle du non-fractionnement des isotopes au cours du transfert de l'eau du sol vers la plante (ZIMMERMANN *et al.*, 1967). Dans ces conditions le contenu isotopique de l'eau prélevée par la plante reflète celui de la source ou un mélange des sources possibles exploitées par les racines. La comparaison de la composition isotopique de l'eau dans la plante avec celle de l'eau des différentes sources possibles peut permettre de déterminer l'origine de l'eau transpirée. L'interprétation du signal isotopique est souvent compliquée par l'existence de plusieurs sources possibles, eau de surface, eau de la nappe ou eau contenue dans différents horizons du sol à différentes profondeurs. Il n'est donc pas toujours facile de déterminer exactement l'origine de l'eau utilisée par la plante car il peut y avoir plus d'une façon de reproduire la composition isotopique de la sève. L'exception à cela est lorsque cette composition correspond à des valeurs extrêmes.

Si l'on veut prendre uniquement en compte l'information isotopique, il faut un modèle d'interprétation simple. On utilise le plus souvent un modèle à compartiments. Le sol peut être divisé en différentes zones avec une composition isotopique connue pour chaque zone (WALKER et RICHARDSON, 1991) ou bien ces compartiments peuvent être la nappe et l'horizon contenant les dernières précipitations (DAWSON et EHLERINGER, 1991). La fraction d'eau extraite de chaque compartiment est déterminée à partir de la composition isotopique de la sève. La difficulté est que la composition isotopique de chaque compartiment doit être relativement homogène et l'extraction racinaire relativement uniforme à l'intérieur du compartiment.

Une alternative au modèle à compartiments serait d'utiliser les données isotopiques dans un modèle d'extraction racinaire mais ces modèles sont généralement plus appropriés pour représenter l'extraction d'eau du sol à long terme alors que l'information isotopique ne représente qu'un seul point dans le temps.

Pour définir la profondeur d'extraction de l'eau par la plante, on peut utiliser les données isotopiques conjointement avec des données de potentiel hydrique du sol comme mesures de la disponibilité en eau pour la plante (BRUNEL *et al.*, 1991 ; THORBURN *et al.*, 1993). L'utilisation des mesures de potentiel hydrique du sol permet de placer les limites des différentes sources d'eau possibles et de confirmer les données isotopiques. De nombreux travaux sont en cours qui

utilisent les mesures isotopiques pour valider d'une façon indépendante des modèles d'utilisation de l'eau par les plantes (HATTON *et al.*, 1992) et les mesures de potentiels hydriques dans le sol fournissent un lien direct avec ces modèles.

L'applicabilité de ces méthodes d'interprétation dépend des erreurs de mesures ou des erreurs inhérentes aux modèles utilisés eux-mêmes. S'il est possible de quantifier les erreurs de mesures (THORBURN *et al.*, 1993 ; WALKER *et al.*, 1991), les erreurs engendrées par l'utilisation d'un modèle simple d'inversion avec des données isotopiques sont plus difficiles à quantifier. Dans les nombreuses études qui ont été publiées, il n'y a jamais eu de tentative de quantification des erreurs associées aux modèles utilisés.

Le besoin d'établir des procédures de validation a été souligné dans un certain nombre d'études récentes. Il est bien connu qu'un fractionnement isotopique se produit dans les feuilles mais le degré avec lequel ceci affecte la composition isotopique ailleurs dans la plante semble varier de pas d'effet (SCHIEGL, 1970) à des variations significatives (BARIAC *et al.*, 1983). LIN et STERNBERG (1993) ont montré qu'une discrimination du deutérium se produit dans les racines de plantes de marais côtiers. WALKER *et al.* (1991) ont montré à partir d'une comparaison inter-laboratoires que différentes techniques d'extraction de l'eau du sol pouvaient conduire à des différences significatives de composition isotopique. La variabilité spatiale des profils isotopiques peut aussi dans certains cas affecter la méthode.

Toute procédure de validation requiert un assez grand nombre de données et serait donc impossible à mettre en œuvre pour chaque étude isotopique. Cependant, en poursuivant les recherches sur le terrain, dans différentes conditions, on réunit les éléments qui permettent d'apprécier l'efficacité des méthodes et de procéder avec confiance pour d'autres situations. Dans le travail qui est présenté ici nous avons utilisé un jeu de données obtenues précédemment (BRUNEL *et al.*, 1991). Les conditions d'expérimentation sur le terrain allaient de « très sèches » à « très humides ».

Le principe de la procédure de validation présentée est de comparer la composition isotopique de l'eau du sol dans les zones à fort potentiel hydrique avec celle de l'eau de la plante. Ceci fournit une estimation de l'erreur globale prenant en compte toutes les erreurs mentionnées plus haut. Cette erreur peut être ensuite comparée aux variations naturelles de la composition isotopique de l'eau des différents réservoirs pour vérifier si ces méthodes isotopiques méritent d'être développées et approfondies. Dans ce travail nous avons également étudié les erreurs engendrées en inversant les données isotopiques avec un modèle à compartiments pour déterminer la proportion d'eau extraite de chaque compartiment. Un modèle à compartiment adapté à notre situation de terrain a été

développé et nous avons analysé la sensibilité de la méthode isotopique aux erreurs induites par les hypothèses. Nous avons également testé la sensibilité des poids respectifs de ^2H et ^{18}O .

Enfin les proportions prédites d'eau extraite de chaque compartiment sont comparées aux zones du sol à potentiel hydrique élevé pour chaque période d'échantillonnage.

DESCRIPTION DU SITE

La zone d'étude est située dans le sud-est de l'Australie près de la petite localité d'Ouyen (35°S 142°E) dans l'État du Victoria. La moyenne des précipitations annuelles est de 340 mm. L'évaporation est comprise entre 1 200 et 1 500 mm par an (bac de classe A). Les températures d'hiver sont douces, moyenne des *maxima* d'environ 16°C et moyenne des *minima* autour de 5°C. Elles excèdent souvent 40°C en été et sont toujours associées à de très basses humidités relatives.

Le site est une dune d'origine éolienne de 7 m de hauteur surmontant une argile lacustre de 1 m d'épaisseur, elle-même située au-dessus de l'aquifère régional sableux.

L'eau de la nappe est salée (40 g l⁻¹). Cette dune est recouverte d'une végétation éparse, une variété d'eucalyptus de 3 à 5 m de hauteur (figure 1).

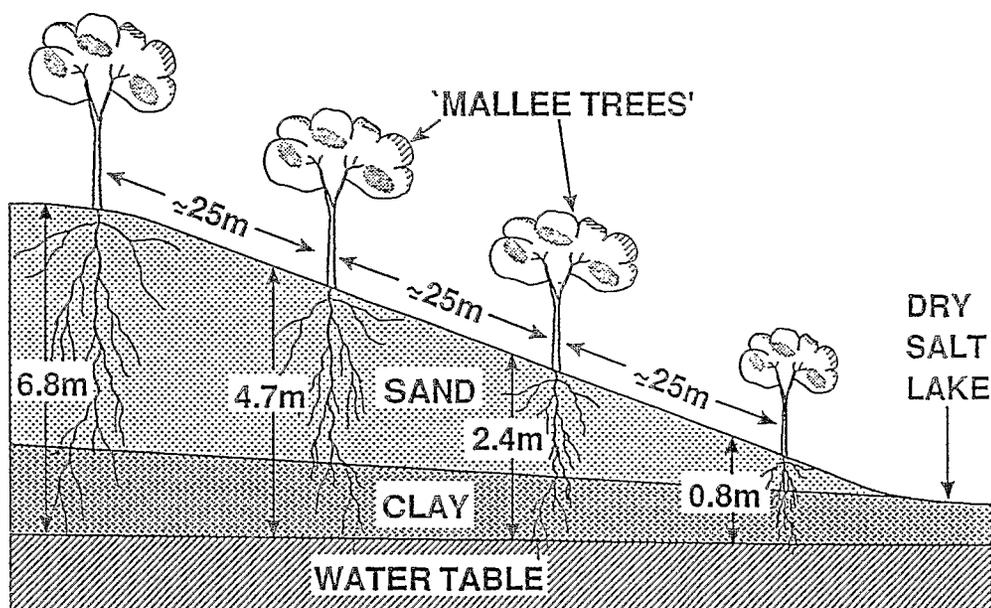


Figure 1 :

Coupe transversale du site d'étude.

MÉTHODES

TERRAIN ET LABORATOIRE

Des échantillonnages de plantes et de sol avaient été effectués en 4 points de la dune situés respectivement à 0,8 m de la nappe (dénomé HBD), 2,4m (dénomé 2HBD), 4,7m (dénomé 2HTD) et 6,8 m (dénomé HTD) (figure 1). Ces prélèvements avaient eu lieu à 10 reprises sur une période de 2 ans (17/5/88, 20/6/88, 17/8/88, 26/9/88, 29/11/88, 2/289, 27/4/89, 13/10/89, 13/12/89, 1/3/90). Les échantillons de sols avaient été prélevés à des intervalles de 10 et 25 cm à l'aide d'une tarière à main et placés dans des récipients de 500 ml hermétiquement fermés.

Pour les échantillonnages 1 à 7, des branchettes d'environ 1 cm de diamètre avaient été prélevées d'une manière aléatoire sur deux arbres pour chaque point, et une fois l'écorce enlevée, placées dans des récipients contenant le liquide utilisé pour la distillation. Pour les 3 derniers échantillonnages, les prélèvements supplémentaires avaient été effectués à différents niveaux des arbres (base du tronc, milieu du tronc, premières branches, branches des extrémités). Sur chacun de ces échantillons on avait séparé le xylème de l'aubier. Enfin des piézomètres avaient été installés aux 4 points d'échantillonnage du site. La nappe s'était élevée de 70 cm à la suite de l'épisode pluvieux important du 10 et 11/5/89, mais était relativement stable autrement.

Les méthodes de laboratoires ont été décrites dans BRUNEL *et al.* (1991)

LE MODÈLE DE DISPONIBILITÉ EN EAU POUR LA PLANTE

Pour notre interprétation nous avons choisi un modèle simple de disponibilité en eau pour la plante.

- (i) Si le potentiel matriciel ou le potentiel osmotique est inférieur à -3,5 MPa (ce qui correspond à une concentration en chlorures $> 20 \text{ g l}^{-1}$ pour le potentiel osmotique), on suppose que seule une quantité négligeable d'eau peut être extraite du sol. Ces limites ont été choisies à partir des observations de terrain qui montrent que le potentiel matriciel est rarement inférieur à -3,5 MPa. (BRUNEL *et al.*, 1991) et qu'au-dessus d'une concentration en chlorures de 20 g l^{-1} seuls des végétaux présentant une adaptation particulière peuvent continuer d'extraire notablement de l'eau. Cette valeur de -3,5 MPa est également citée par McQUEEN et MILLER (1968) pour des végétations de régions arides et semi-arides.
- (ii) Si le potentiel matriciel ou le potentiel osmotique est élevé à une profondeur donnée dans le sol (potentiel matriciel $> -1 \text{ MPa}$; concentration en chlorures $< 10 \text{ g l}^{-1}$), on fait l'hypothèse que toute l'eau utilisée par la plante est essentiellement extraite à ce niveau. Ceci ignore

généralement les détails de la distribution racinaire (sauf pour la situation étudiée ici où des racines vivantes ont été observées dans les échantillons).

Avec des conditions limites aussi larges on peut penser que tout le profil possède de l'eau disponible pour les plantes. Mais si cela est le cas on doit pouvoir y associer un large intervalle de compositions isotopiques et la comparaison avec la composition isotopique de la sève a alors peu de chance de fournir une information intéressante. Cependant dans la pratique, l'aridité du site associée à la salinité de l'eau de la nappe signifient en fait qu'il y a souvent seulement un intervalle de profondeur étroit dans lequel l'eau est disponible pour la plante.

LE MODÈLE À COMPARTIMENTS

Dans l'étude présentée ici, nous avons considéré trois compartiments, la surface du sol 0-0,4 m, un niveau intermédiaire, 0,4 - 0,8 m pour 2HBD et 0.4 -1,6 m pour 2HTD et la région frange capillaire-nappe. Dans l'horizon de surface du sol, la composition isotopique de l'eau change en réponse à l'évaporation et à l'infiltration. Dans la zone intermédiaire, la composition isotopique reste relativement constante. La zone frange capillaire-nappe est considérée comme trop salée pour que l'eau puisse être utilisée par la végétation. Ceci revient en définitive à considérer deux compartiments seulement, ce qui est probablement le cas le plus fréquent en régions arides et semi-arides.

On suppose que la composition isotopique de la sève résulte d'un mélange d'eau extraite de ces deux compartiments. La fraction f d'eau extraite de la couche supérieure peut être calculée à partir d'un bilan de masse isotopique. Celui-ci conduit à l'équation suivante pour ^2H :

$$\delta_2^u f + \delta_2^l (1-f) = \delta_2^{sv} \quad (1)$$

dans laquelle δ_2^u est la valeur moyenne de la concentration isotopique en deutérium de l'eau du compartiment supérieur, δ_2^l est la valeur moyenne de la concentration isotopique en deutérium de l'eau du compartiment inférieur, et δ_2^{sv} la concentration isotopique en deutérium dans la sève des arbres. On peut écrire une équation similaire pour ^{18}O . Si on utilise seulement un isotope, l'équation (1) peut être résolue pour f . Si on utilise les deux isotopes on cherche la valeur de f qui minimise l'équation (2)

$$wR_2^2 + (1-w)R_{18}^2 \quad (2)$$

où

$$R_2 = \frac{f\delta_2^u \delta_2^{18} + (1-f)\delta_2^l}{\delta_2^{sv}} \quad (3)$$

et R_{18} est le terme correspondant pour ^{18}O .

Si $w = 0$, seules les mesures de ^{18}O sont prises en compte, si $w = 1$, seules les mesures de ^2H sont utiles. La valeur $w = 0,5$ donne un poids égal aux mesures de ^2H et ^{18}O . Dans le tableau 2 figurent les valeurs de f pour $w = 0, 0,5 ; 1$, calculées pour tester la sensibilité du modèle.

RÉSULTATS

LA COMPOSITION ISOTOPIQUE DE LA SÈVE LE LONG DE SON TRAJET

Il n'y a pas de variation significative de la composition en ^2H dans la sève de la base du tronc à l'extrémité des branches dans les tissus conducteurs, ni de différence entre ces tissus et l'aubier (BRUNEL *et al.*, 1991)

Relations $^2\text{H} - ^{18}\text{O}$

Quelques exemples de relations $^2\text{H} - ^{18}\text{O}$ pour l'eau du sol, la sève et l'eau de la nappe sont représentés sur les figures 2a, b, c. Sur ces figures sont également représentées les droites de meilleur ajustement.

Plusieurs commentaires peuvent être faits :

- (i) Les valeurs de ^2H et ^{18}O sont étroitement corrélées, à la fois pour la sève et pour l'eau dans le sol.
- (ii) Pour l'eau dans le sol, on constate que la partie inférieure des profils correspondant à l'eau des horizons plus profonds et à celle de la nappe peut être représentée par une droite de pente relativement constante avec le temps. La partie supérieure des profils qui correspond aux horizons superficiels possède une pente plus faible et variable qui traduit l'évaporation (ALLISON et HUGHES, 1983).
- (iii) Les valeurs représentant la composition isotopique de la sève se trouvent à proximité de la droite de meilleur ajustement des données d'eau dans le sol, ce qui doit être normalement le cas si toute l'eau utilisée par la plante vient du sol. L'absence d'un biais important des données de sève par rapport à celles du sol est un élément qui confirme que d'une part la végétation étudiée ne modifie pas la composition isotopique de l'eau qu'elle prélève et que d'autre les extractions d'eau du sol et de la plante sont consistantes.
- (iv) Il existe une variation significative avec le temps de la composition isotopique de la sève. D'une manière générale, aux époques de sécheresse (figure 2b), la composition isotopique de la sève est proche de celle de l'eau de la nappe alors qu'aux périodes plus humides elle s'en éloigne (figure 2a) tout en restant dans la partie inférieure du profil. Si la composition isotopique de la sève ne se trouve pas à proximité de l'une des extrémités de la droite de corrélation de l'eau dans le sol, on ne peut pas déterminer d'une manière absolue la région du sol d'où la plante

extrait l'eau sans faire d'autres hypothèses et d'autres mesures. Un cas particulier intéressant est celui de la figure 2c où toute l'eau utilisée provient d'une nappe perchée temporaire créée par un épisode pluvieux particulièrement important mais ponctuel (70 mm en 24 h).

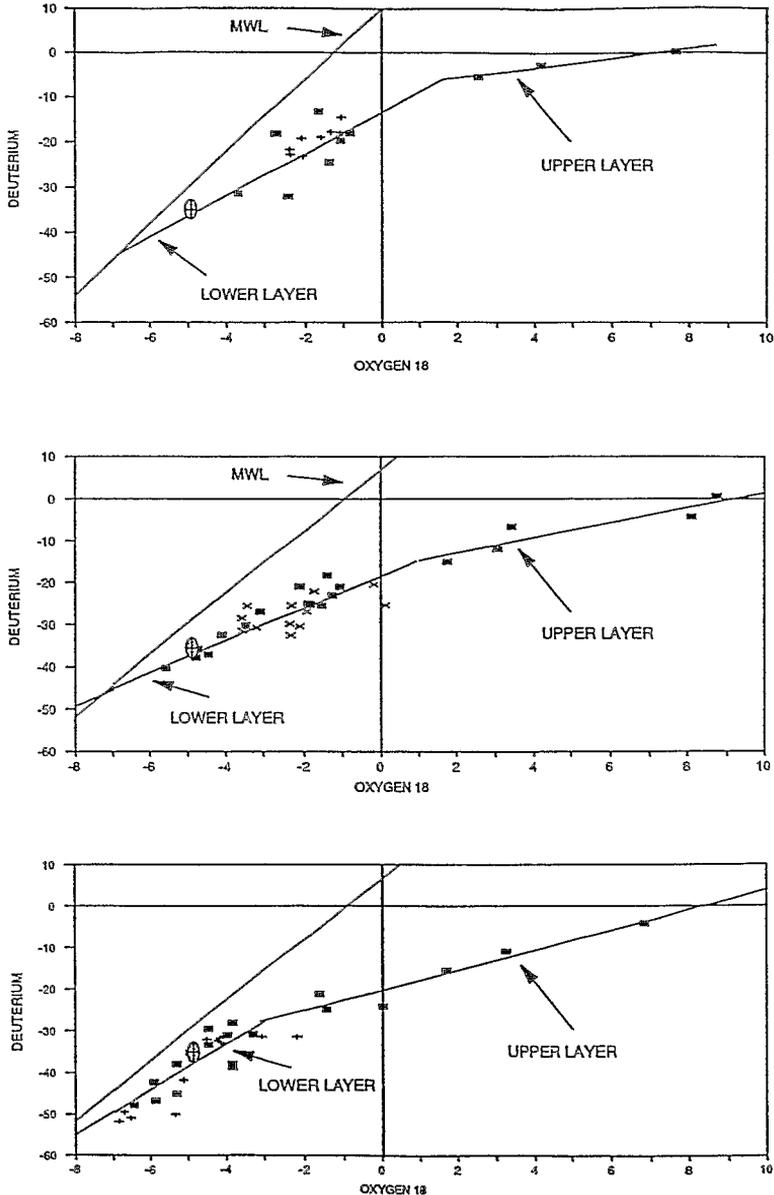


Figure 2 :

Relations $^2\text{H}-^{18}\text{O}$ pour les échantillonnages 5, 6 et 8. \oplus représente la composition isotopique de l'eau de la nappe, \times la composition moyenne de la sève et \blacksquare celle de l'eau dans le sol.

ANALYSES DE QUELQUES SITUATIONS ÉTUDIÉES SUR LE TERRAIN**UTILISATION DU MODÈLE DE DISPONIBILITÉ EN EAU POUR LA PLANTE**

Dans les figures 3a, b, c, sont représentés quelques exemples de profils de potentiels hydriques du sol, teneurs en chlorures et compositions en deutérium. L'intervalle compris entre les lignes pointillées verticales représente les limites 1 000 et 3 500 kPa pour le potentiel matriciel et 10 – 20 g l⁻¹ pour la concentration en chlorures, fixées pour notre modèle. Les bandes striées horizontales représentent les zones du sol d'où l'eau extraite par la végétation a le plus de chance de provenir. Les bandes verticales représentent les intervalles de composition en deutérium dans lesquels doit se trouver la composition de la sève compte tenu des contraintes précédentes.

Pour l'échantillonnage 4 au site 2HBD (figure 3a), la concentration en chlorures dans la solution du sol est faible entre 0 et 0,4 m et le potentiel hydrique est élevé en dessous de 0,1 m. La végétation doit donc utiliser l'eau entre 0,1 et 0,4 m (bande horizontale). Dans cet intervalle la composition en deutérium de l'eau du sol est comprise entre -1,7 et 2,8 ‰ (bande verticale). La valeur mesurée pour la composition de la sève est -1,5 ‰. Les données isotopiques sont en accords avec celles caractérisant la disponibilité en eau pour la plante.

Pour 2HBD, échantillonnage 8 (figure 3c), le potentiel hydrique est élevé entre 0 et 0,3 m et faible en dessous de 0,5 m. La concentration en chlorures est faible jusqu'à 0,5 m, moyenne entre 0,5 et 1,75 m et élevée ensuite. Dans la zone 0,5 – 1,75 m les valeurs de deutérium dans l'eau du sol varient entre -48 et -38 ‰. La valeur moyenne de la composition de la sève est -45,6 ‰. L'accord est encore bon entre les deux séries de données.

Les résultats de l'échantillonnage 2 au site 2HTD (figure 3b) montrent un cas intéressant où deux régions du sol peuvent être utilisées par la végétation. La composition en deutérium de la sève reflète une zone intermédiaire et suggère une extraction partielle à partir de ces deux régions.

La méthode qui vient d'être décrite permet une comparaison entre la gamme des valeurs de compositions isotopiques prédites pour la sève à partir de mesures de la disponibilité en eau pour la plante et les valeurs de cette composition réellement mesurées dans la plante. Parfois l'intervalle prédit est trop important pour que la comparaison ait une signification, mais celui-ci peut aussi être très petit (3 à 4 ‰). La figure 4 montre une compilation des valeurs mesurées et prédites pour l'ensemble des sites et des échantillons étudiés. Les valeurs se situent généralement à proximité de la droite de pente 1, la zone comprise entre les deux droites en traits pointillés représente l'intervalle ± 5 ‰. Presque toutes les gammes de valeurs prédites recouvrent celles des valeurs observées dans l'intervalle ± 5 ‰, alors même que la composition en deutérium de la sève varie dans de larges proportions, de -48 ‰ à -1 ‰. Un graphique similaire pour ¹⁸O montre un intervalle de ± 1 ‰.

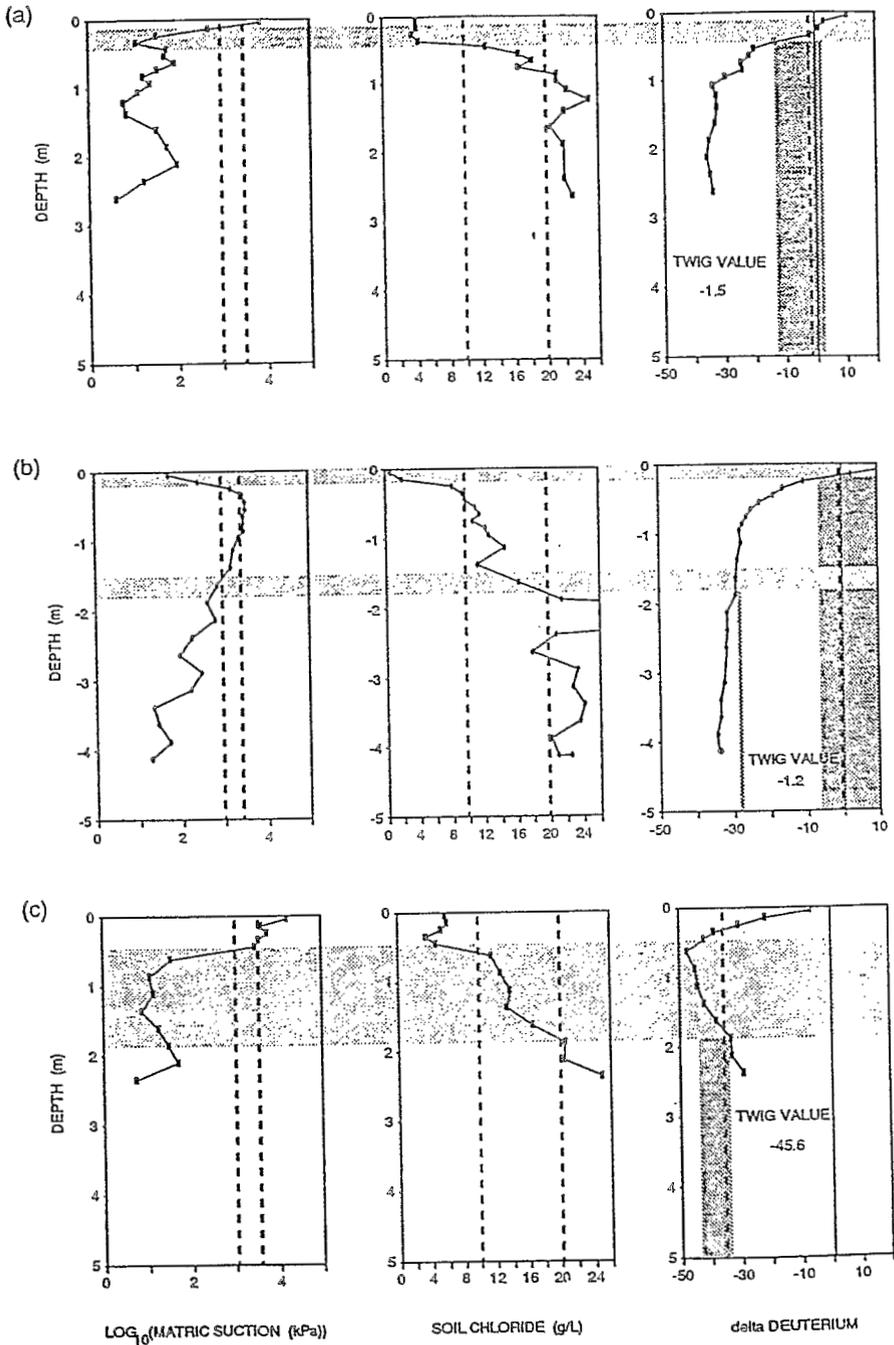


Figure 3 :

Variations avec la profondeur du potentiel hydrique du sol, de la concentration en chlorures et de la teneur en deutérium de l'eau du sol pour les sites 2HBD, échantillonnage 4 (a), 2HTD, échantillonnage 2 (b) et 2HBD échantillonnage 8 (c).

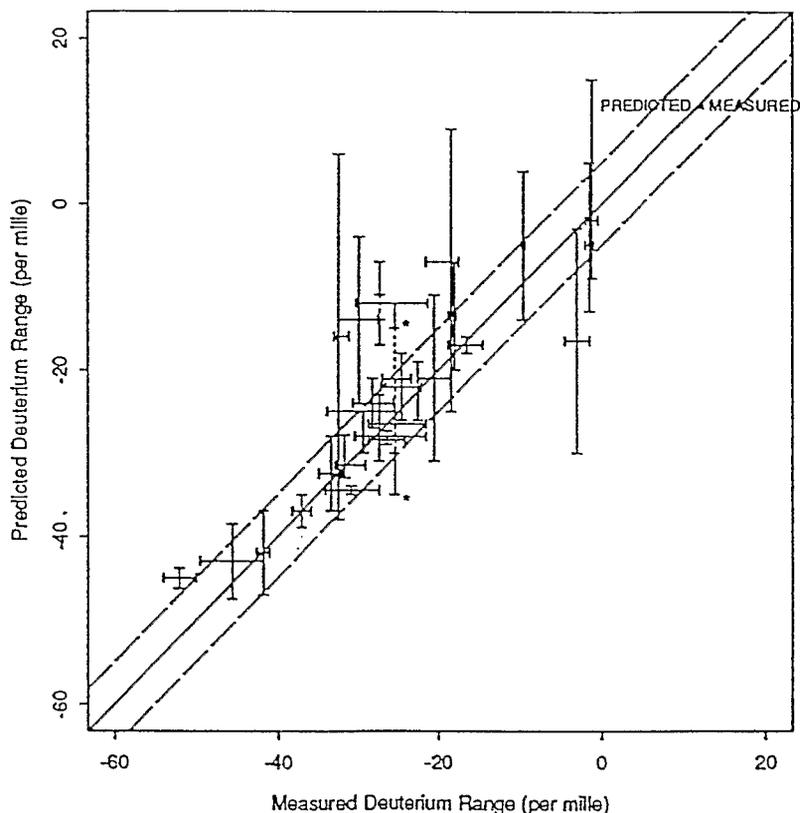


Figure 4 :

Relation entre la composition en deutérium de la sève mesurée, et celle prédite à partir des potentiels hydriques et des teneurs en chlorures du sol.

UTILISATION D'UN MODÈLE DU SOL À DEUX COMPARTIMENTS

Les résultats de l'utilisation d'un modèle à compartiments figurent dans les tableaux 1 et 2. Par exemple pour l'échantillonnage 4 au site 2HBD, le modèle indique que 70 à 90 % de l'eau est extraite des 40 premiers centimètres selon le poids respectif que l'on donne à ^2H et ^{18}O . Pour l'échantillonnage 6, le modèle à compartiments indique qu'il n'y a pas d'eau extraite du compartiment supérieur. Pour l'échantillonnage 2 au site 2HTD, le modèle indique que seulement 7 % de l'eau utilisée par la végétation provient du compartiment supérieur. Ces résultats sont en accord avec ceux du modèle de disponibilité en eau pour la plante décrit précédemment. La sensibilité de ces fractions f aux erreurs de mesures peut être améliorée en variant le poids de ^2H et ^{18}O . Le tableau 2 montre des variations allant jusqu'à 20 % si l'on modifie la valeur de w de 0 à 1.

Tableau 1

Moyennes pondérées des compositions isotopiques de l'eau des compartiments inférieurs et supérieurs (%), composition isotopique mesurée de la sève et fraction (*f* %) de l'eau extraite du compartiment supérieur calculée à partir des valeurs de deutérium soit à partir des valeurs de deutérium et d'oxygène -18

Ech.	2	3	4	5	6	8	9
COMPOSITION ISOTOPIQUE AU SITE 2HTD							
Comp.	-13.7	-18.5	-3.2	-15.7	-11.5	-33.9	-22
Sup.	1.5	-1.1		1.7	3.3		
Com.	-27.7	-27.7	-27.7	-27.7	-27.7	-27.7	-27.7
Inf.	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	
Sève	-26.7	-22.8	-0.5	-20.6	-29.4	-33	-30.8
	-3.7			-1.8	-2.3	-3.6	
f%	7	55	100	56	0	85	0
COMPOSITION ISOTOPIQUE AU SITE 2HBD							
Comp.	-10.7	-10	2.3	-16.9	-3.8		
Sup.	2	2	1.8	-0.8	3.5		
Comp.	-25	-25	-25	-25	-25		
Inf.							
Sève	-25.1	-27.5	-1.5	-14.4	-28.1		
	-4.5	-3.6	-0.05	-1	-3		
f%	0	0	86	100	0		

Tableau 2

Fraction d'eau extraite du compartiment supérieur par la végétation calculée à partir des valeurs de ¹⁸O and ²H pour différentes valeurs de w

	2HTD-5	2HTD-6	2 HBD-4
w = 0.0	56	-10	86
w = 0.5	60	7	67
w = 1.0	59	7	67

COMPARAISON ENTRE LES DEUX MODÈLES

La proportion d'eau extraite de chaque compartiment par la végétation estimée par ce modèle peut être comparée avec les régions possibles où l'eau peut être extraite par la plante, prédites par le modèle de disponibilité en eau. C'est ce qui est représenté sur la figure 5. Sur cette figure, les zones hachurées matérialisent les régions favorables à l'extraction d'eau telles qu'elles ont été définies par le modèle de disponibilité en eau. En abscisse supérieure sont indiquées les

proportions d'eau extraites du compartiment supérieur par la végétation, telles qu'elles ont été calculées par le modèle à compartiments à partir des données isotopiques. Au site 2HTD, la végétation utilise seulement de l'eau située en surface pour les échantillonnages 4 et 8, uniquement de l'eau située en profondeur pour les échantillonnages 5, 6 et 7 et probablement un mélange pour l'échantillonnage 2.

Pour le site 2HBD, la végétation utilise de l'eau de surface pour l'échantillonnage 5, de l'eau située en profondeur pour les échantillonnages 2, 4, 6, 8 et probablement un mélange pour l'échantillonnage 7. Dans ces deux cas le modèle à compartiment est en accord avec les informations fournies par le modèle de disponibilité en eau.

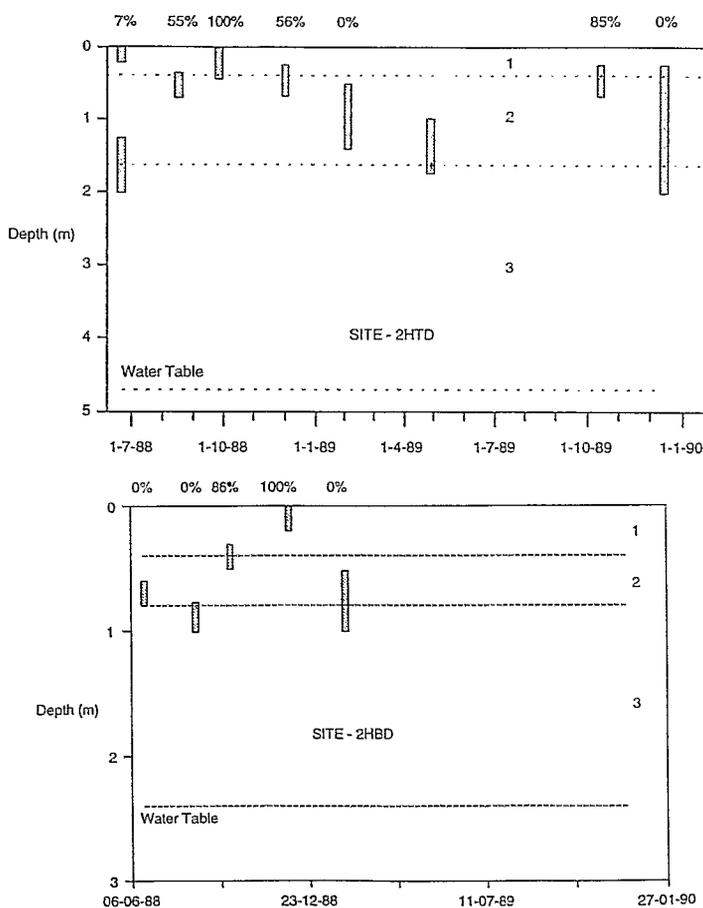


Figure 5 :

Profondeur d'extraction de l'eau par la végétation définie à partir des données du sol (potentiel hydrique, salinité) et fraction d'eau extraite du compartiment supérieur par cette végétation calculée à partir des compositions isotopiques.

DISCUSSION

Dans l'expérimentation de terrain décrite ici, on a mesuré non seulement les compositions isotopiques de l'eau dans la plante et dans le sol, mais aussi d'autres variables du sol. Ce jeu de données recouvre une gamme variée de conditions d'humidité du sol et de salinité, ceci nous permet :

- (i) de tester les hypothèses concernant le prélèvement isotopique par la plante ;
- (ii) de discuter l'interprétation des mesures isotopiques et les limites de la méthode.

HYPOTHÈSES GÉNÉRALES

Dans l'introduction nous avons décrit trois méthodes différentes d'interprétation des données isotopiques dans la plante. Deux d'entre elles (modèle à compartiment et modèle de disponibilité en eau) ont été utilisées pour interpréter le présent jeu de données. La troisième méthode qui suppose un modèle d'extraction racinaire avec la profondeur n'était pas appropriée pour ce type de végétation. Les principales différences entre les deux méthodes résident dans le nombre de données nécessaires et le degré de complexité du modèle.

HYPOTHÈSES COMMUNES AUX DEUX MÉTHODES

- (i) il n'y a pas de fractionnement des isotopes stables de l'eau lorsque la plante extrait de l'eau du sol ;
- (ii) le prélèvement des matériaux (sol, végétation) et l'extraction d'eau n'engendrent pas d'erreur significative sur la mesure isotopique ;
- (iii) il n'y a pas de variation significative de la composition isotopique de la sève le long de son trajet dans le tronc et les branches ;
- (iv) la composition isotopique de l'eau dans le sol est homogène latéralement au moins dans la limite de la zone des racines de l'arbre.

HYPOTHÈSES SPÉCIFIQUES

Pour chacun des modèles il est nécessaire de formuler des hypothèses plus spécifiques. Dans le cas du modèle à compartiments, en faisant varier le poids respectif de ^2H et ^{18}O , on peut estimer la sensibilité de la fraction d'eau estimée extraite de chaque compartiment, aux erreurs associées au modèle (20 %), (voir tableau 2).

Dans le cas du modèle de disponibilité en eau pour la plante, l'extraction d'eau est déterminée à partir des potentiels matriciel et osmotique du sol. Le fait que les données s'alignent autour de la première bissectrice suggère que nos hypothèses sont valides pour une gamme étendue de conditions d'humidité du sol et de salinité, du moins pour la situation de terrain décrite ici. La déviation de

part et d'autre de cette droite donne une indication de la somme des erreurs liées au prélèvement, à l'extraction d'eau en laboratoire, à l'analyse et aux hypothèses de travail. Ces erreurs semblent être inférieures à 5 ‰. Pour que la méthode soit satisfaisante ces erreurs doivent être très inférieures aux variations de la composition isotopique dans la sève (50 ‰) ou à la variation naturelle avec la profondeur de la composition de l'eau du sol (30 ‰).

La validation, dans le cadre de cette étude, des hypothèses énoncées plus haut a de plus larges implications.

L'hypothèse (i) n'avait été vérifiée qu'en laboratoire (WALKER et RICHARDSON, 1991 ; THORBURN *et al.*, 1992). Les données de terrain analysées dans ce travail fournissent l'évidence que cette hypothèse est valide pour une gamme étendue de situations naturelles.

Pour l'hypothèse (ii), WALKER *et al.* (1991), ont montré que les techniques de laboratoire d'extraction de l'eau du sol pouvaient conduire à des erreurs importantes de mesures de la composition isotopique, en particulier pour les sols secs. Les résultats présentés ici montrent néanmoins que la combinaison de toutes les erreurs est inférieure à 5 ‰. S'il y a un biais significatif dans la méthode d'extraction, il est le même pour le sol et la plante.

Concernant l'hypothèse (iii), des données obtenues par BARIAC *et al.* (1983) auraient tendance à montrer qu'elle n'est pas valide dans tous les cas (il s'agissait dans cette étude de plantes annuelles). D'autres études de terrain confirment néanmoins sa validité (SCHIEGL, 1970 ; BRUNEL *et al.*, 1991, BRUNEL *et al.*, 1993).

Il y a peu de chances pour que l'hypothèse (iv) soit strictement vraie. Le mélange de l'eau provenant d'une précipitation avec l'eau contenue dans le sol risque d'entraîner des variations latérales de la composition isotopique en raison de la microtopographie ou de la distribution des micropores du sol. Néanmoins les résultats obtenus sur les sites de l'expérimentation Hapex-Sahel au Niger ne font pas apparaître de variabilité latérale significative, il est vrai que le type de sol, sableux en surface n'était pas fondamentalement différent.

Le temps de trajet mis par l'eau pour se déplacer de l'extrémité des racines à l'extrémité des branches a été étudié par FORSTEL et HUTZEN (1982) sur des pommiers. THORBURN *et al.* (1993) a mesuré des vitesses de déplacement de la sève pour des espèces d'eucalyptus résistant à la sécheresse, les valeurs étaient de 1 à 4 mètres par jour. En se basant sur des vitesses du même ordre de grandeur, les valeurs de temps de trajet de l'eau pour la végétation du site étudié ici, seraient comprises entre 0,5 et 3 jours. Si l'humidité du sol a changé pendant cet intervalle, cela peut introduire une erreur.

Le modèle à compartiment est satisfaisant. Dans la plupart des cas la composition isotopique de l'eau du sol est différente de celle des précipitations. L'eau des horizons superficiels est généralement enrichie en isotopes lourds en raison du processus d'évaporation (ALLISON et HUGHES, 1983). Cet enrichissement

peut persister jusqu'à une certaine profondeur en provoquant un fort gradient de composition isotopique de l'eau dans les horizons supérieurs (voir l'exemple de la figure 4c).

Il peut se faire que les données isotopiques ne fournissent aucune information utile. On travaille ici avec les teneurs naturelles et si la variabilité est faible, la méthode ne sera pas sensible.

CONCLUSIONS

Les conclusions que l'on peut tirer de cette étude sont les suivantes :

- (i) les modèles simples à compartiments utilisant des données isotopiques peuvent donner de bons résultats ;
- (ii) pour une interprétation plus élaborée il est nécessaire de posséder des données supplémentaires telles que potentiel hydrique ou humidité du sol ;
- (iii) on peut utiliser les données isotopiques pour valider les modèles d'utilisation de l'eau par la plante ;
- (iv) l'hypothèse de non fractionnement isotopique de l'eau par les racines est vérifiée pour une gamme étendue de situations naturelles sur le terrain.
- (v) la méthode d'extraction de l'eau du sol et de la plante pour analyse isotopique, utilisée dans cette étude semble satisfaisante ;
- (vi) la somme des erreurs faites sur l'échantillonnage, l'extraction, l'analyse et les hypothèses de travail semble être inférieure à 5 ‰ pour ^2H .

BIBLIOGRAPHIE

- ALLISON G. B., HUGHES M. W., 1983. The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *J. Hydrol.*, 60 : 157-173.
- BARIAC T., FERHI A., JUSSEMAND C., LETOLLE R., 1983. Sol-plante-atmosphère : contribution à l'étude de la composition isotopique de l'eau des différentes composantes de ce système. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies, IAEA, Vienna, 561-576. (IAEA-SM-267/23)
- BRUNEL J-P., WALKER G. R., WALKER C. D., DIGHTON J. C., KENNETT-SMITH A. K., 1991. Using stable isotopes of water to trace plant water uptake. In *Stable Isotopes in Plant Nutrition, Soil Fertility*, IAEA and FAO International Symposium, Vienna, 1-5 October 1990.
- BRUNEL J.P., DIGHTON J.C., WALKER G.R., MONTENY B., 1993. Using stable isotopes of water in soil, vegetation and atmosphere as an indicator of land-atmosphere interaction. Hapex-Sahel 1992. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, 6-10 December 1993.
- DAWSON T. E., EHLERINGER J. R., 1991. Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 350 : 335-336.
- EHLERINGER J. R., COOK C. S., 1991. Carbon isotope discrimination and xylem D/H ratios in desert plants. International Symposium on the use of stable isotopes in plant nutrition, soil fertility, and environmental studies. IAEA and FAO International Symposium, Vienna, 1-5 October 1990.
- EHLERINGER J. R., DAWSON T.E., 1992. Water uptake by plants : perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell and Environment*, 15 : 1073-1082.
- FEDERER C.A., 1979. A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resour. Res.*, 15 : 555-642.

- FORSTEL H., HUTZEN H., 1982. Use of water with different ¹⁸O-content to study transport processes in plants. In stable isotopes, Schmidt, H. L., Forstel, H. and Heinzinger, K. (Eds.), Elsevier, Amsterdam. 511-516.
- HATTON T. J., PIERCE L. L., WALKER J., 1992. Ecohydrological changes in the Murray-darling Basin: Part 2 - Development and tests of a water balance model. *J. Appl. Ecol.*, 30, 2, 274:284.
- LIN G., STERNBERG L. da S. L., 1993. Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants. In : Ehleringer, J. R., Hall, A. E. and Farquhar, G. D. (Editors). Stable isotopes and plant carbon/water relations (Academic Press)
- MCQUEEN I. S., MILLER R. F., 1968. Calibration and evaluation of wide-range gravimetric method for measuring moisture stress. *Soil Science*, 106, 3: 225-231.
- MENSFORTH L. J., THORBURN P. J., TYERMAN S. D., WALKER G. R., 1994. Sources of water used by riparian *Eucalyptus camaldulensis* overlying highly saline groundwater. *Oecologia* (in press).
- SCHIEGL W., 1970. Natural deuterium in biogenic materials. Thesis, Univ. South Africa, Pretoria.
- THORBURN P. J., WALKER G. R., 1993. The source of water transpired by *Eucalyptus camaldulensis* : Soil, groundwater or streams ? In: Ehleringer, J. R., Hall, A. E. and Farquhar, G.D. (Editors), Stable isotopes and plant carbon/water relations (Academic Press), 511-527.
- THORBURN P. J., WALKER G. R., BRUNEL J-P (1993). Extraction of water from eucalyptus trees for analysis of deuterium and oxygen-18 : laboratory and field techniques. *Plant, Cell and Environment*, 16, 269-277.
- WALKER C. D., RICHARDSON S.B., 1991. The use of stable isotopes of water in characterising the source of water in vegetation. *Chem. Geol., Isot. Geosci.*, 94 : 145-158.

- WALKER G. R., WOODS P. H., ALLISON G. B., 1991. Interlaboratory comparison of extraction methods to determine the stable isotope composition of soil water. IAEA/UNESCO International Symposium on the Use of isotope techniques in water resources development. Vienna, March, 1991.
- WHITE J.W.C., COOK E.R., LAWRENCE J.R., BROEKER W.S., 1985. The D/H ratios of sap in trees: implications for water sources and tree ring D/H ratios. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49 : 237-246.
- ZIMMERMAN U., EHHALT D., MUNNICH K. O., 1967. Soil water movement and transpiration : changes in the isotopic composition of the water. *Isotopes in Hydrology*, IAEA, Vienna, 567-585.