

# Connaissance des eaux souterraines: détermination de transpiration à partir du flux de sève

Jean Roy, Diana Chavarro, Maciek Lubczynski, Obolokile Obakeng, Jacob Kimani, Walter Mapanda, Alejandra Fregoso

Tous ont participé dans le cadre d'ITC, Enschede, Pays-Bas

## Introduction: BILAN HYDRIQUE et TRANSPIRATION - milieu semi-aride

En milieu aride ou semi-aride, le paramètre  $T$  - transpiration - représente une quantité critique dans l'établissement du bilan hydrique ( $P - Q - G - E - T = \Delta S$ ; les paramètres sont identifiés comme suit  $P$ : précipitation,  $Q$ : écoulement de surface,  $G$ : écoulement souterrain,  $E$ : évaporation,  $T$ : transpiration,  $S$ : emmagasinement). Dans les cas où le niveau de la nappe est profond, il n'y a pratiquement pas d'herbe active durant la saison sèche et la transpiration devient alors essentiellement une question liée à la consommation en eau des arbres. Cette dernière peut être quantifiée par la mesure du flux de sève des arbres. Dans la figure 1, les principaux consommateurs d'eau sont les arbres à feuillu vert. Dans ce qui suit, on s'intéresse surtout au "comment" tandis que les résultats numériques sont disponibles dans plusieurs thèses produites à ITC. Les travaux ont été réalisés en Espagne, au Portugal et au Botswana et ce sont des exemples de ce dernier pays qui illustrent cette affiche. La figure 9.1 le situe en Afrique Australe.



Figure 1: scène typique du Kalahari (Botswana) en saison sèche

## SURVOL MÉTHODOLOGIQUE

Lorsque la transpiration  $T$  se résume à celle des arbres, il nous faut: (1) identifier les espèces d'arbres en place - pour l'exemple décrit ici, il y a 9 espèces significatives, (2) mesurer les flux de sève sur chaque espèce, (3) les normaliser par rapport aux mensurations des spécimens puis (4) intégrer ces mesures dans le temps durant la période d'intérêt et (5) spatialement sur le territoire à l'étude. Les mensurations (diamètre du tronc et aire de la couronne) sont mesurées dans le 1<sup>er</sup> cas au pied à coulisse et dans le second en traçant sa projection verticale sur le sol pour ensuite en mesurer la surface. La mesure de flux a une composante temporelle diurne - i.e. essentiellement de jour et plus particulièrement lorsqu'il n'y a pas de couverture nuageuse - et saisonnière: la disponibilité d'eau, e.g. contenu dans le sol près de la surface et profondeur de la nappe, module cette dernière composante. Comme les outils de mesures courants ont été développés surtout pour les climats tempérés où les arbres sont réguliers et contiennent beaucoup de sève, il a fallu adapter et vérifier le mode de mesure. L'identification des 9 espèces d'arbres (surtout de la famille des acacias ici) se fait sur le terrain par leurs caractéristiques botaniques, e.g. feuilles et morphologie. Pour une classification automatique, on procède sur le site à la mesure de leur signature de réflectance spectrale dans le visible et le proche infrarouge. L'imagerie satellitaire à haute résolution permet ensuite l'identification, le dénombrement et le dimensionnement des arbres sur un territoire donné. Après intégration des données de flux de sève sur chacun des arbres inventoriés, on obtient la transpiration sur ce même territoire pour la période concernée. Les aspects suivants sont plus élaborés dans la suite de cette présentation: mesure du flux de sève, correction du gradient thermique naturel, vérification in-situ, vérification en laboratoire, signature spectrale, intégration sur un territoire donné.

## MESURE DU FLUX DE SÈVE - 1) sonde Granier

La mesure du flux de sève (données sol) utilisée ici est totalement différente de la technique de covariance des turbulences (eddy correlation) utilisée pour d'autres mesures de flux. Ici, la mesure discrimine par espèce d'arbres. Ces mesures de flux de sève se font habituellement par différentes techniques thermiques (sigles anglais: TDP, HPV, HFD etc.); ici nous utilisons la sonde TDP i.e. par dissipation thermique (Granier, 1985). La Figure 2.1 en montre une installation typique avant recouvrement. Le capteur supérieur contient un fil chauffant (~ 0.2 W) et un thermocouple tandis que son voisin inférieur n'a que le



Figure 2: (1) sonde Granier (TDP), (2) écran thermique, (3) mât d'acquisition: anémomètre et pyranomètre au sommet, hygromètre et température de l'air, enregistreur numérique (DataHog2) à la base, le panneau solaire se distingue difficilement au sol à droite du mât. (à noter: épines d'acacias partout!)

thermocouple. La séparation verticale est d'environ 10 cm tandis que leur enfoncement - dans un mini-tube métallique - est de l'ordre de 3 cm. En l'absence de flux de sève, le filament chauffant produit une élévation de température de 10 à 14°C entre les 2 capteurs ( $\Delta T_{max}$ ). Lorsque la sève circule, elle transporte (convection) une partie de la chaleur produite par le filament et la différence de température entre les deux capteurs ( $\Delta T$ ) diminue. La relation empirique entre la "densité du flux de sève" ( $S_s$ ) et ces 2 paramètres de mesure est:

$$S_s = 0.0119 ((\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T)^{1.231} \quad [cm^3 / (cm^2 \cdot h)] \quad [1]$$

L'influence du vent et du soleil sur la température extérieure de l'arbre est atténuée par un écran thermique (Figure 2.2). Des mesures d'ensoleillement (pyranomètre) et de variables météorologiques (humidité et température de l'air, vitesse du vent) permettent de contrôler les mesures de flux (Figure 2.3).  $S_s$  est ensuite multiplié par l'aire de l'aubier pour obtenir le flux de sève. En milieu semi-aride, à cause des grandes irrégularités d'un spécimen à l'autre, l'aire de l'aubier est souvent déterminée par coupe et teinture e.g. Merck Eosin-B.

## MESURE DU FLUX DE SÈVE - 2) correction gradients thermiques naturels

Les mesures brutes de flux de sève en régions semi-arides sont sujettes à des sources d'erreur plus importantes que pour la plupart des mesures en forêts européennes ou américaines. Les différences de température nuit-jour, d'ensoleillement et l'exposition au vent - arbres plus clairsemés - et la quantité de sève moindre contribuent à ces erreurs. Elles se manifestent en particulier par un gradient thermique naturel (GTN) qui provoque un  $\Delta T$  non-nul même en l'absence de chauffage entre les 2 capteurs ce qui biaise donc directement l'estimation de  $S_s$ . Do et Rocheteau (2002) ont déjà observé ce phénomène au Sénégal et ont

proposé une technique transitoire mais qui exige la détermination des constantes de la relation [1] pour chaque espèce. Leur solution a été adoptée ici en y ajoutant un modèle de réponse multi-exponentielle qui suit de très près (Figure 3) les observations de terrain et qui permet de garder les constantes originales de Granier (relation [1]). Elle tient compte des valeurs finies de conductivité thermique et de chaleur spécifique de l'aubier et s'exprime sous la forme:

$$\Delta T = \sum R_{e_i} H (1 - e^{-R_{e_i} H C_i}) \quad [2]$$

où  $R_{e_i}$  et  $C_i$  sont respectivement la résistance et la capacité thermique d'une des composantes thermiques  $i$  du système de mesure; 3 composantes suffisent en pratique.  $H$  est le débit de chaleur (0.2 W) et  $t$  est le temps. L'implémentation pratique sur

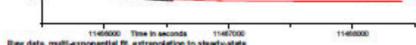


Figure 3: sonde Granier en temps partagé  
—: modèle, \*: valeurs mesurées

le terrain suppose les modifications suivantes: (1) un séquenceur est ajouté sur la ligne d'alimentation du filament chauffant pour produire les périodes actives et inactives ('ON' et 'OFF' sur la Figure 3). Le taux d'échantillonnage est augmenté à 120 échantillons à l'heure pour pouvoir bien analyser la transitoire. En contrepartie, la valeur du GTN et le  $\Delta T$  dû seulement à l'excitation thermique du filament sont maintenant bien discriminés et l'erreur d'estimation de  $S_s$  peut être éliminée.

## MESURE DU FLUX DE SÈVE - 3) vérification

Le programme de vérification de mesures se justifie d'une part par l'irrégularité des arbres rencontrés en zone semi-aride - par rapport à leurs correspondants européens ou américains où les outils de mesures ont été développés - e.g. asymétrie, blessures ou malformation, sécheresse etc. et d'autre part par la modification apportée à la mesure inspirée par Do et Rocheteau (2002) i.e. mesure TDP en temps partagé. La vérification est faite en 2 temps: in-situ par la technique Robert (1977) et en laboratoire en utilisant à la fois la technique Roberts (1977) et l'imagerie de RMN (Résonance Magnétique Nucléaire).

a) in-situ: De façon à automatiser et à utiliser le même enregistreur numérique que pour la mesure de flux de sève décrite à gauche (Sonde Granier) une pompe numérique (KNF Stepdos) a été ajoutée - voir Figure 4.1 - à laquelle un détecteur de niveau diélectrique et une sortie de volume pompé numérique ont été adaptés. La détection diélectrique permet d'opérer sans restriction de résistivité de l'eau. La Figure 5 montre

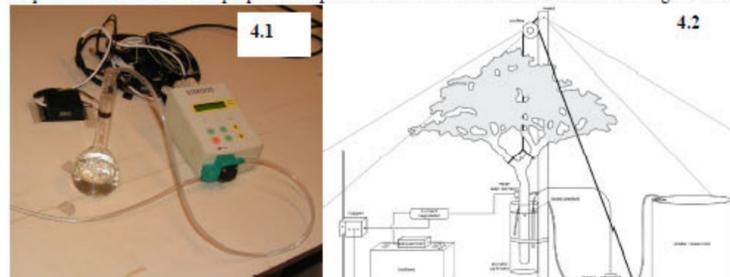


Figure 4: (1) pompe KNF Stepdos, le boîtier noir à gauche de la pompe contient un compteur de volume et un détecteur de niveau diélectrique, (2) schéma de l'implémentation de Roberts (1977): la sonde Granier (TDP) en mode temps partagé avec son séquenceur est maintenue dans l'arbre. L'arbre sectionné des racines est maintenu par un mât et alimenté en eau par un cylindre d'acrylique où le détecteur de niveau est logé. La pompe numérique maintient le niveau du cylindre constant: le volume pompé est égal à la quantité d'eau consommée par l'arbre. Ce volume est enregistré numériquement en même temps que les données de la sonde Granier. (Figure 4.2: Chavarro, 2009)

certain aspects de l'implémentation de terrain de la vérification in-situ. La vérification in-situ évite les biais dus aux conditions de laboratoire mais ne permet pas de mesures aussi complexes qu'en laboratoire.



Figure 5: in-situ Roberts: (gauche) mât de soutien de l'arbre, réservoir d'alimentation (en vert) pour la pompe, (centre) haut: arrimage de l'arbre, bas: cylindre d'acrylique solidaire de l'arbre hors sol, (droite) de gauche à droite: cylindre d'acrylique, pompe, réservoir, accumulateur, séquenceur.

b) en laboratoire: les techniques de mesures de flux thermiques (e.g. TDP, HPV, HFD, en ordre de coût) permettent d'enregistrer les variations temporelles de flux. Elles souffrent toutes d'imprécision quand à la valeur absolue du flux en particulier lorsqu'il s'agit d'arbres irréguliers [voir début de 3) vérification]. La résolution spatiale de tels capteurs est grossière et mal définie pour des arbres irréguliers. Dans cette section on complète donc la vérification au moyen d'un imageur RMN à axe vertical (Université Wageningen - Centre RMN) qui a une excellente résolution spatiale en mode fluxmètre. Cette vérification en laboratoire inclut toutes les composantes: sonde Granier en temps partagé, vérification Roberts avec pompe numérique, imagerie de flux en RMN. La figure 6.1 schématise l'expérience. Il s'agit d'une étape: cette mesure est assez "éloignée" des conditions de terrain. A quand l'imagerie de flux de sève RMN in-situ?

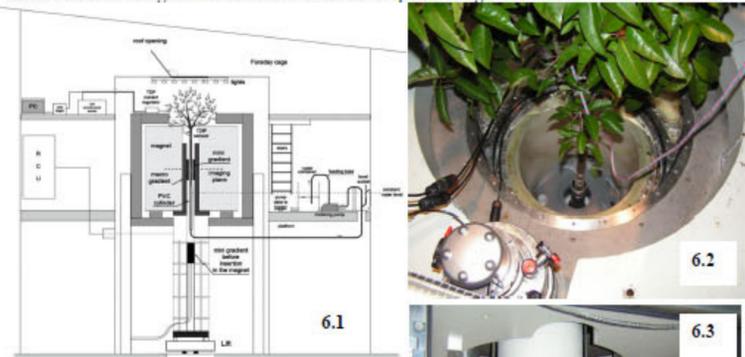


Figure 6: imagerie de flux de sève en RMN: (6.1) schéma de la mesure: haut-gauche: sonde Granier en temps partagé, hygromètre, thermomètre, etc., haut: feuillage de l'arbre avec éclairage de serre, centre droit: pompe numérique et ajustement de niveau, bas: vérin de levage des bobines de gradient, centre: aimant supraconducteur, bobine de gradients, tronc de l'arbre dans tube de PVC à niveau d'eau constant, (6.2) diamètre intérieur de l'enceinte abritant l'aimant supraconducteur, feuillage de l'arbre, raccords des sondes Granier, (6.3) Insertion des bobines de gradient dans l'axe de l'aimant au moyen d'un vérin, au centre de la structure: tube PVC avec tronc de l'arbre et réserve d'eau constante, (6.4) gauche: réservoir d'alimentation de la pompe, au sol: pompe avec sortie numérique vers l'enregistreur, mât blanc et rouge: détecteur de niveau et alimentation du tube PVC par la pompe. (Figure 6.1: Chavarro, 2009)

Il n'a pas été possible de transporter un des spécimens du Botswana à l'imageur RMN de Wageningen (Pays-Bas). Des arbres acquis localement, à deux saisons différentes, ont été utilisés à date. L'imagerie permet de voir que même avec un arbre très régulier le flux de sève est concentré dans un anneau très restreint et que l'utilisation de teinture (Eosin-B) remplit son rôle mais ne peut constituer un indicateur proportionnel au flux: voir Figure 7.

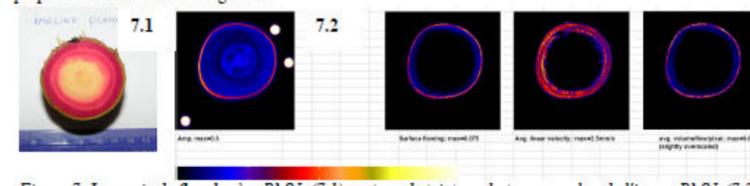


Figure 7: Imagerie de flux de sève RMN: (7.1): patron de teinture du tronc au plan de l'image RMN, (7.2) images RMN du tronc: de gauche à droite: (a) amplitude i.e. contenu en eau, (b) surface où l'eau est mobile, (c) vitesse moyenne de l'eau, (d) image du flux de l'eau (débit par pixel). (Figure 7.2: Windt (2005) - Wageningen NMR Center)

## SIGNATURE SPECTRALE POUR LES 9 ESPÈCES

Les mesures de réflectance spectrale ont été faites au moyen d'une plateforme optique assemblée sur place et montée sur un crochet de grue. Les capteurs utilisés sont: capteurs 4 bandes de Skye, l'un orienté vers le haut et l'autre vers la cible et une caméra 3 bandes (TetraCAM ADC G-R-NIR à interface USB) - Figure 8.1. Par télécommande de l'opérateur, une paire de panneau à réflectance contrôlée (~ gris & ~ blanc par Kodak) sont alternativement placés pour remplir le champ de vision des deux capteurs orientés vers la cible pour contribuer à la calibration de la réflectance à l'étape du traitement - Figure 8.2. Suivant cette stratégie, deux opérateurs sont requis (Figure 8.3 et 8.4): l'un pour la gestion de la plateforme d'acquisition optique et l'autre pour la grue. L'imagerie est enregistrée ici directement sur un PC portable tandis que les données de réflectance intégrée (Skye) sont enregistrées sur le même système (DataHog2) qui a servi aux données de



Figure 8: acquisition de signature spectrale sur les 9 espèces à l'étude: (8.1) plateforme semi-assemblée avec capteurs Skye 4 bandes, en haut du bras vertical: vers le haut et au centre de la plateforme: vers la cible, caméra 3 bandes Vert, Rouge et proche-infrarouge ("Agricultural Digital Camera"), enregistreur numérique, télécommande de panneau et interface USB, (8.2) essais préliminaires avec panneaux de calibration Kodak, (8.3) contrôle de la cible perçu par la caméra, télécommande de panneau de calibration, gestion des sites de mesures, (8.4) la grue elle-même est commandée hydrauliquement - conception classique - à proximité du poste du conducteur (conduite à droite).

mesures de flux de sève. Les intervalles de temps sont notés et servent à repérer l'information pour chaque espèce. Pour couvrir, pour chaque espèce, un bouquet composé uniquement de l'espèce à l'étude, il a fallu parfois se déplacer de plusieurs dizaines de km.

## CLASSIFICATION ET INTÉGRATION SPATIALE

La classification des espèces d'arbres est basée sur leur signature spectrale (visible et proche infrarouge) et a été pilotée sur 5 aires contrôlées au sol (carrés jaunes Figure 9.1 d) à l'intérieur du périmètre du projet (Figure 9). Suite à l'intégration dans le temps pour une période définie, e.g. ici la saison sèche, on procède à l'intégration spatiale sur un territoire donné tenant compte de chaque arbre suivant son espèce et sa pondération par les mensurations.

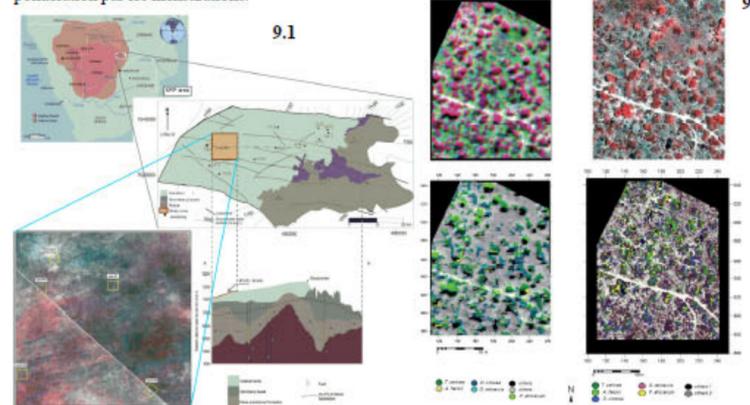


Figure 9: Classification des espèces: (9.1) dans le sens horaire à partir du coin haut gauche: (a) Botswana dans l'Afrique Australe, (b) aire du projet KRP à l'ouest de Serowe (Botswana), (c) section litho-hydrologique incluant le carré étudié, (d) imagerie satellitaire à haute résolution spatiale (IKONOS) et les 5 aires contrôlées au sol; (9.2) exemple de classification: aire #2: gauche = a): images aéroportées, droite = b): images satellitaires, haut: images originales, bas: images classifiées. [de Obakeng (2007), SGC (1988), Chavarro (2009)]

Épilogue: En milieu semi-aride, la transpiration  $T$  est un paramètre important du bilan hydrique.  $T$  peut être déterminé par une combinaison de mesures au sol et une intégration sur une région donnée avec l'aide d'imagerie satellitaire. Kimani et al. (2007) décrit les techniques de classification dans ce contexte tandis que Chavarro (2009) fournit les données de transpiration y compris sous forme de carte. Un tel exercice permet de déceler les aspects du procédé les plus susceptibles d'être améliorés e.g. identification des espèces, calibration in-situ.

Reconnaissance: les travaux ont été faits par des équipes d'ITC sous la direction hydrogéologique de M.W. Lubczynski avec le support d'ITC et du DGS pour les composantes au Botswana. Le centre RMN de l'Université Wageningen a réalisé l'imagerie de flux de sève par RMN.

## RÉFÉRENCES:

- Chavarro, D., 2009, Tree transpiration mapping from upscaled sap flow in the Botswana Kalahari; UT-ITC, Enschede, The Netherlands, 140 p.
- Do, F., et Rocheteau, A., 2002, Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies; Tree Physiology, 22, 641-648.
- Granier, A., 1985, Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres; Ann. Sci. for., 42 (2) 193-200.
- Kimani, J., Hussin, Y., Lubczynski, M., Chavarro-Rincon, D., and Obakeng, O.T., 2007, Mapping Savannah Trees in Kalahari Using High Resolution Remote Sensing Images and Object-Oriented Classification; IJC, 3, 29-39.
- Obakeng, O.T., 2007, Soil moisture dynamics and evapotranspiration at the fringe of the Botswana Kalahari; VUA, Amsterdam, The Netherlands, 218 p.
- Roberts, J., 1977, The use of tree-cutting technique in the study of the water relations of mature Pinus sylvestris L.; J. of Exp. Botany 28, (104) 751-767.
- SGC, 1988, Serowe Groundwater Resources Evaluation Project, Final Report, MMR&WA, DGS, Lobatse Botswana, 286 p.
- Windt, C.W., 2005, communication personnelle, Centre NMR de l'Université Wageningen, The Netherlands.