

Cours Formation des Ingénieurs Forestiers

Fonctionnement hydrique et hydraulique des arbres

F. Lebourgeois

Enseignant-Chercheur

AgroParisTech - UMR ENGREF-INRA 1092 LERFOB - Equipe Ecologie Forestière

francois.lebourgeois@engref.agroparistech.fr

Plan de l'exposé

1. Les voies de circulation de l'eau dans le SVAT

2. Que se passe-t-il en cas de stress hydrique ?

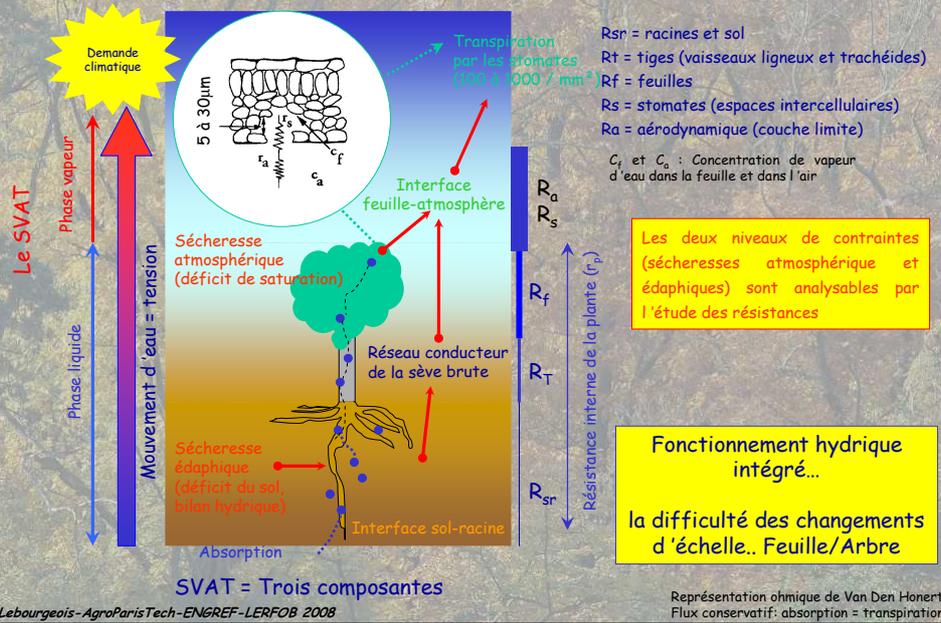
- * Modification des zones de prélèvement en eau
- * Augmentation des tensions internes (notion de potentiels hydriques)
- * Régulation des pertes en eau (niveau feuille, arbre)
- * Les différentes stratégies de résistance

3. Cavitation et embolie

4. Bilan hydrique d'une parcelle forestière

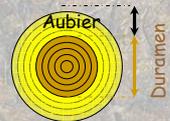
- * Relation transpiration et ETP
- * Relations Transpiration, RU et LAI

Les voies de circulation de l'eau dans le Système Sol-Végétation-Atmosphère (SVAT)



La complexité du système conducteur...

- Chaque élément, vaisseau ou trachéide possède une forme qui est très rarement un tube cylindrique lisse... (ouvertures latérales intercalées, plaques perforées)
- Les arbres sont des organismes pérennes dont les éléments du système conducteur restent actifs plusieurs années. Dans un tronc, une branche, une grosse racine, on appelle aubier l'ensemble des éléments actifs pour le transport de l'eau



Type	Espèces	Dia. Éléts cond.	Vitesse sève
Zone poreuse	Chêne, Châtaignier, Orme	150-400 µ	5-50 m/h
Pores diffus	Hêtre, Charme, Peuplier	50-100 µ	1-5 m/h
Résineux	Pins, Sapins, Douglas	20-50 µ	0,5-2 m/h

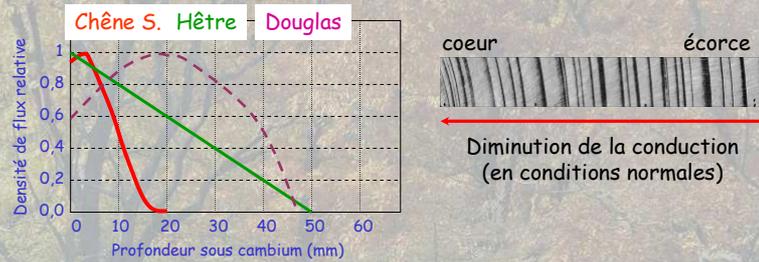
Caractéristiques des transferts hydriques dans le xylème des différents groupes anatomiques

La complexité du système conducteur....

(Lebourgeois 1999)		Nb cerne	Largeur (cm)	% dans le tronc
50-90 ans Dia = 37 cm	CHP	13	2,8	18
	CHS	14,5	3,4	21
> 120 ans Dia CHP = 58 cm Dia CHS = 48 cm	CHP	16,8	2,3	10
	CHS	17,3	2,7	13

Aubier CHS > CHP ...

Meilleure conduction ?



Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

La caractérisation des résistances... notion de potentiel hydrique

Le potentiel hydrique est défini comme le « travail » qu'il faut fournir au système pour faire passer une masse d'eau de l'état d'eau liée à celui d'eau libre (=état de référence)

Analogie avec la loi d'Ohm (1826)
 $U = RI$
 U = Δ potentiel électrique
 R = résistance
 I = intensité

$$\Psi_{sol} - \Psi_{feuille} = \frac{1}{g_L} \times T$$

g_L : Conductance hydraulique spécifique entre le sol et les feuilles (mmol/m²/s/Mpa)
 T = Transpiration (mmol/m²/s)

$\Psi_{feuille} = \Psi_{sol} - \frac{T}{g_L}$

Δ tension ⇒ Δψ < 0

Mouvement d'eau = tension

Demande climatique

Eau liée (passage flux liquide → flux vapeur) force de tension élevée

feuilles

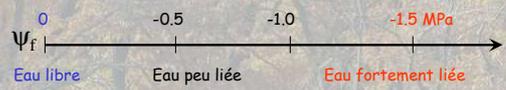
Sol

Eau peu liée force de tension faible

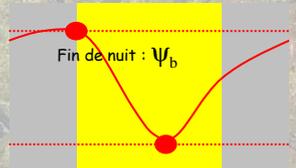
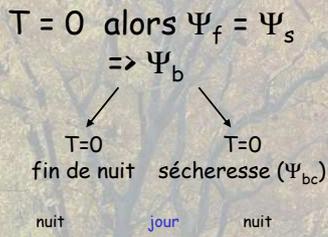
Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

La caractérisation des résistances... notion de potentiel hydrique

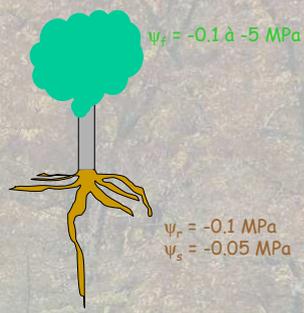
$$\Psi_{\text{feuille}} = \Psi_{\text{sol}} - \frac{T}{g_L}$$



1 bar = 0,1 MPa = force de 1 kg/cm²



Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008



La caractérisation des résistances... notion de potentiel hydrique

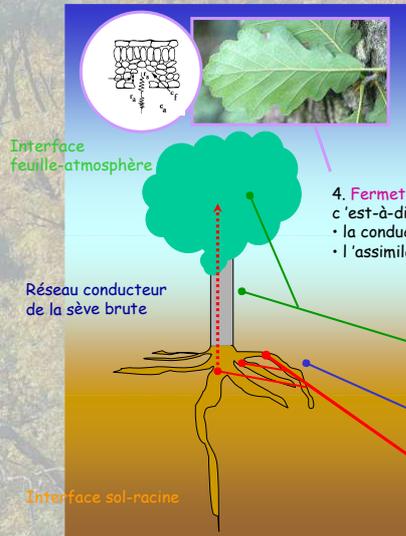
Mesure du potentiel hydrique d'un rameau de chêne à la bombe de Scholander
 Photo Nathalie BRÉDA

Fig. 5: Schéma de la chambre à pression de SCHOLANDER.

On applique une pression jusqu'à ce qu'une goutte d'eau soit observable sur l'échantillon. La pression appliquée équivaut au potentiel hydrique.

Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

Quels sont les modifications du fonctionnement hydrique des arbres en cas de sécheresse édaphique ?



4. **Fermeture des stomates** ... régulation des pertes en eau c'est-à-dire de la **TRANSPIRATION**... diminution de :
 • la conductance stomatique (g_s en $\text{mmol/m}^2/\text{s}$ ou g_c en cm/s)
 • l'assimilation carbonée (A en $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)

Régulation = phénomène réversible
 Dysfonctionnement = phénomène irréversible

Cavitation et embolie... rupture irréversible de la colonne d'eau
 perte de conductivité (%)

3. **Augmentation** des forces de tension... diminution des potentiels hydriques (valeurs plus négatives : Ψ de -1 à -5 MPa)

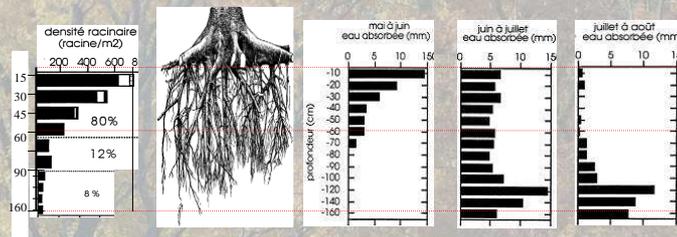
2. **Modification** des zones de prélèvement de l'eau... surface puis en profondeur

1. **Détection** par les racines de l'assèchement du sol... (diminution du Ψ du sol) ...envoi d'un message chimique aux parties aériennes...
 ... rôles de l'Acide Abscisique (ABA) racinaire et d'autres hormones ?? (thèse C. Fort 1997)

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Modification des zones de prélèvement au niveau du sol...

Répartition des prélèvements d'eau le long d'un profil de sol sous frêne au cours d'un dessèchement estival. L'eau absorbée est calculée à partir des variations d'humidité volumique par horizon, mesurées à la sonde à neutron. La répartition des densités racinaires sur fosses distinguent 4 classes de diamètre: 0-2 mm en noir, 2-5 mm en blanc, 5-10 mm et > 10 mm en grisé. Les % de racines 0-2 mm par grands horizons pédologiques sont indiqués (Bréda *et al.* 2001)

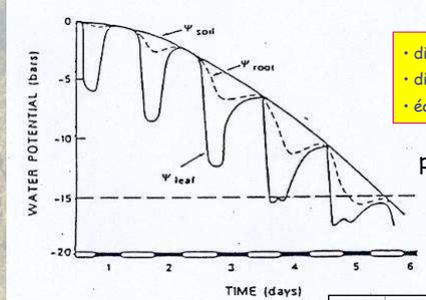


En début de saison... prélèvement dans les horizons de surface

En fin de saison... prélèvement dans les horizons profonds... 8% des racines 0-2 mm assurent l'alimentation en eau

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Augmentation des forces de liaison... diminution des potentiels hydriques

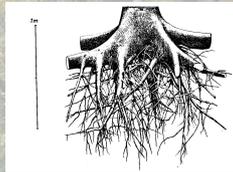


- diminution des potentiels
- diminution de l'amplitude entre Ψ_b et Ψ_m
- équilibrage Ψ_{sol} et Ψ_{arbre}

$pF=4,2 \lll \Psi_b = -1,6 \text{ MPa}$

Ψ_b chêne sessile
Sol à -25 cm
Sol à -140 cm

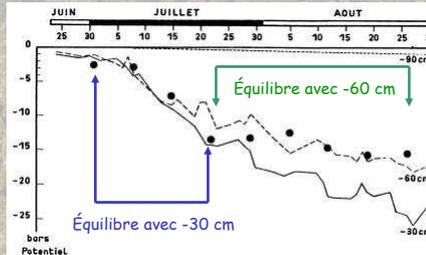
Evolution des potentiels dans le sol et de l'état hydrique de chênes sessiles au cours de la saison 1992 (Bréda 1994)



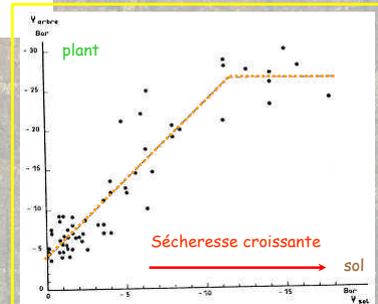
Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008
Chute feuille 50% 3 nov (307)

Augmentation des forces de liaison... diminution des potentiels hydriques

Evolution du potentiel dans le sol à 3 niveaux de profondeur: -30 cm, -60 cm, -90 cm, avec en parallèle l'évolution du potentiel de base de douglas de 22 ans (ronds noirs) (4 arbres, été 1982) (Aussenac et al. 1984)

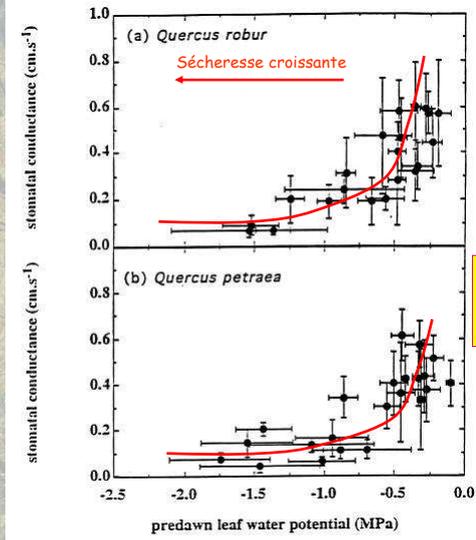


Relation entre le potentiel du sol et le potentiel de jeunes plants (4 ans) de Cèdre de l'Atlas (Aussenac et Finkelstein 1983)



Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Fermeture des stomates... régulation des pertes en eau... diminution de la conductance stomatique (niveau feuille)



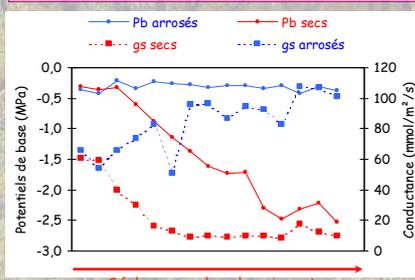
Evolution de la conductance stomatique de chênes pédonculé et sessile adultes en relation avec le potentiel de base. Les mesures ont été effectuées pendant l'année 1991. Chaque point est la moyenne de 10 arbres. Les barres représentent les écart-types (Bréda et al. 1991)

- diminution rapide de la conductance
- maintien à un niveau non nul (20% de la gc sans stress)

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Fermeture des stomates... régulation des pertes en eau... diminution de la conductance stomatique (niveau feuille)

Pin laricio de Corse (plants de 2 ans).
Evolution des paramètres hydriques au cours d'une sécheresse édaphique (Lebourgeois et al. 1998)

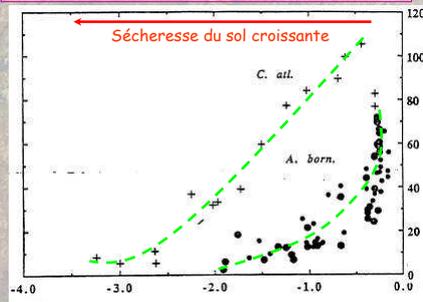


(fin saison)	Pb (MPa)	gs (mmol/m ² /s)
Arrosé	-0,3	100
Sec	-2,3	10

- Début de contrôle très précoce (-0,5 MPa) et blocage de la transpiration pour des Ψ élevés (-1,6 MPa)
- gs < 10% de gs max

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008c

Cedrus Atlantica et Abies bornmulleriana
Evolution des paramètres hydriques au cours d'une sécheresse édaphique (Guehl et al. 1991)

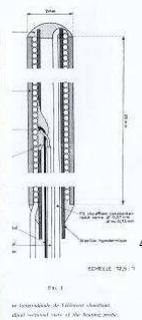
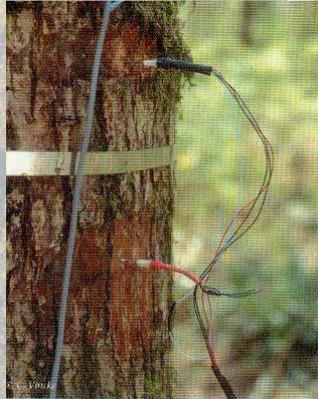


(à -2 MPa)	Pb (MPa)	gs (mmol/m ² /s)
Cèdre	-2	35 (-65%)
Sapin	-2	5 (-90%)

- Sapin = pin laricio... => évitement
- Cèdre : début de contrôle très tardif et blocage de la transpiration pour des Ψ très faibles (-3 MPa)

Fermeture des stomates... régulation des pertes en eau... diminution de la transpiration (niveau arbre)

La densité de flux de sève permet d'appréhender la transpiration (mesure quantitative) au niveau de l'arbre. Elle est mesurée à l'aide d'un capteur de flux de sève (Granier 1985)



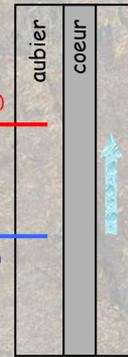
2 thermocouples

Chauffé (qqes 10 ième °C)

ΔT

Écart env. 10 cm

Non chauffé (T° du bois)



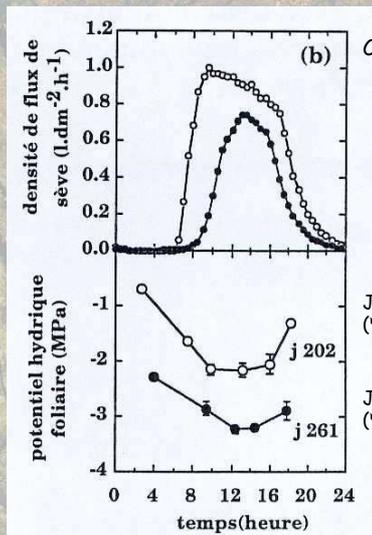
$$F = cste \times \Delta T \times \text{Surface Aubier}$$

$$F \text{ en l. dm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$$

Photo 3 - Un capteur de flux de sève (méthode de dissipation thermique). (Vincke 2004)

Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

Fermeture des stomates... régulation des pertes en eau... diminution de la transpiration (niveau arbre)



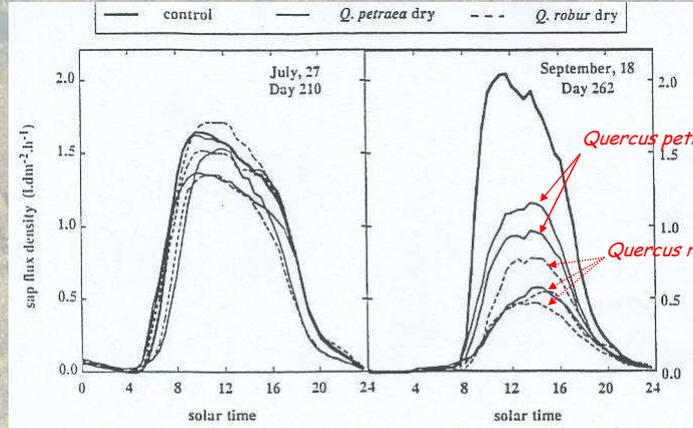
Chêne sessile adulte (Bréda *et al.* 1995)

J202 : Mi-juillet - absence de stress hydrique ($\Psi_b = -0,5$ MPa)

J261 : Mi-septembre - stress hydrique assez fort ($\Psi_b = -2,1$ MPa)

Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

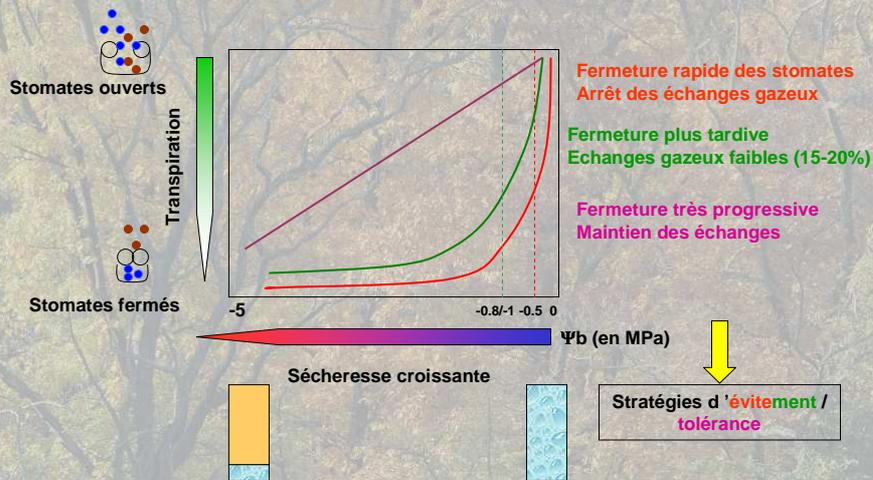
Fermeture des stomates... régulation des pertes en eau... diminution de la transpiration (niveau arbre)



Diurnal time-course of individual xylem sap flux density measured on 3 droughted trees of *Q. petraea* (line) and *Q. robur* (dotted line) and mean sap flux calculated on 4 control trees (mean value for both species) (bold line) for two stress intensities :

(Bréda et al. 1993) Day 210 : $\Psi_{wp} = -0.5$ MPa for both treatments
 Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008 plot : $\Psi_{wp,p} = -0.3$ MPa ; dry plot : $\Psi_{wp} = -1.7$ MPa.

Les différents types de comportement des arbres vis-à-vis de la sécheresse



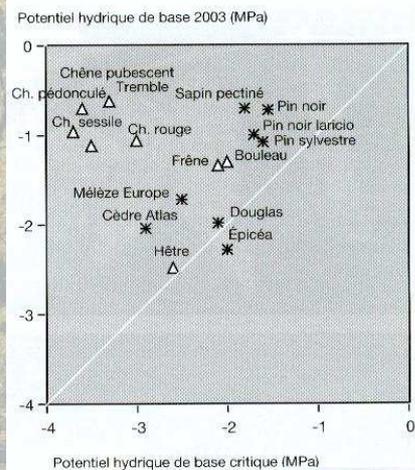
Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

Les différents types de comportement des arbres vis-à-vis de la sécheresse (Aussenac 1993)



Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Potentiels hydrique de base critique des différentes essences forestières



Bréda et al. 2004, RFF, vol 51, n°2, 109-131

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008



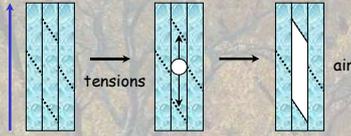
Douglas, Epicéa



Feuille sèche hêtre

Cavitation et embolie des tissus conducteurs....

Rupture de la colonne d'eau... **Cavitation** (détection acoustique) ...puis l'espace se remplit d'air... **Embolie** (approche hydraulique) (Cochard 1991, Lemoine 2000)



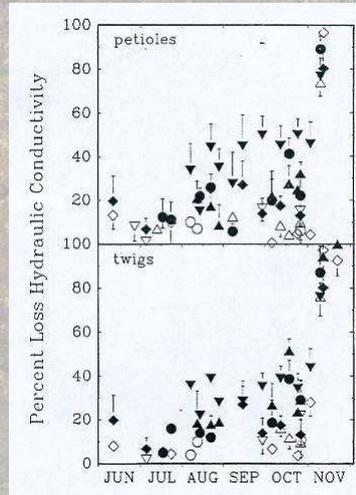
EMBOLIE

Hivernale
le gel

Conifères : insensibles
Pores diffus : peu ou pas sensibles
Zone poreuse : très sensibles
(chênes : fréquente et brutale)

Estivale
la sécheresse

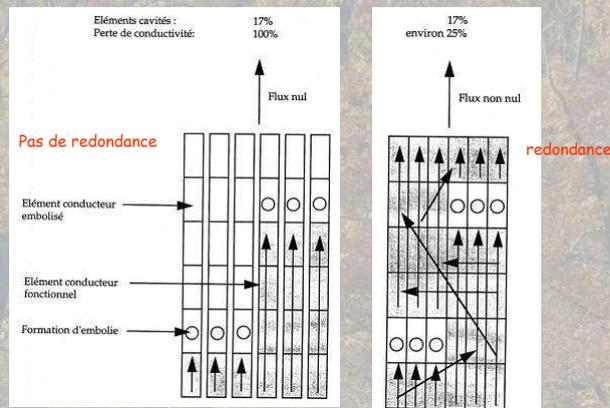
Établissement des courbes de vulnérabilité... perte de « conductivité hydraulique »



Chênes sessiles - 30 ans - conditions naturelles

Embolie estivale... les mécanismes de protection sont multiples (Tyree et al. 1994):

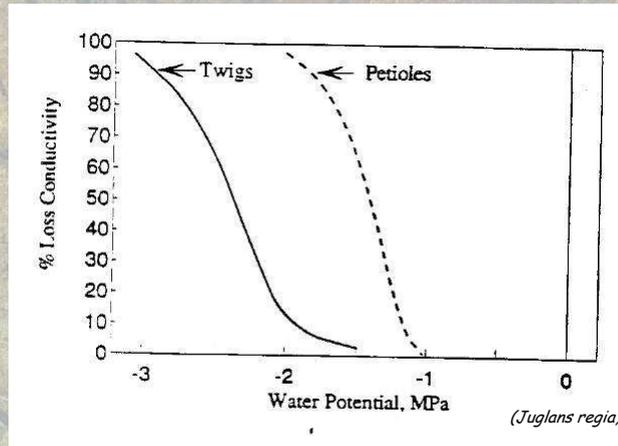
- 1) redondance des éléments conducteurs
- 2) segmentation hydraulique (pétiole, rameau)
- 3) régulation stomatique (feuille)



(Lemoine, 2001)

Embolie estivale... les mécanismes de protection sont multiples (Tyree et al. 1994):

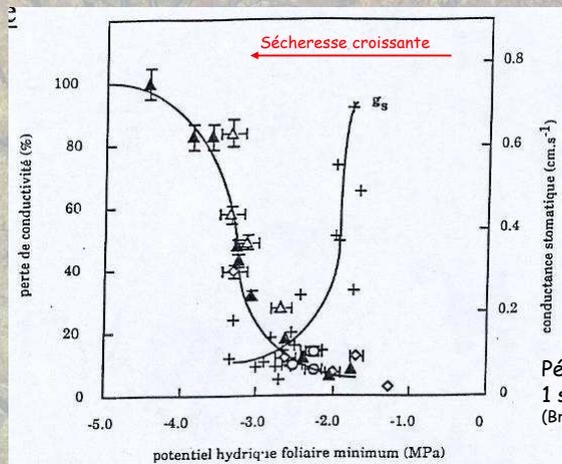
- 1) redondance des éléments conducteurs
- 2) **segmentation hydraulique (pétiole, rameau)**
- 3) **régulation stomatique (feuille)**



Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

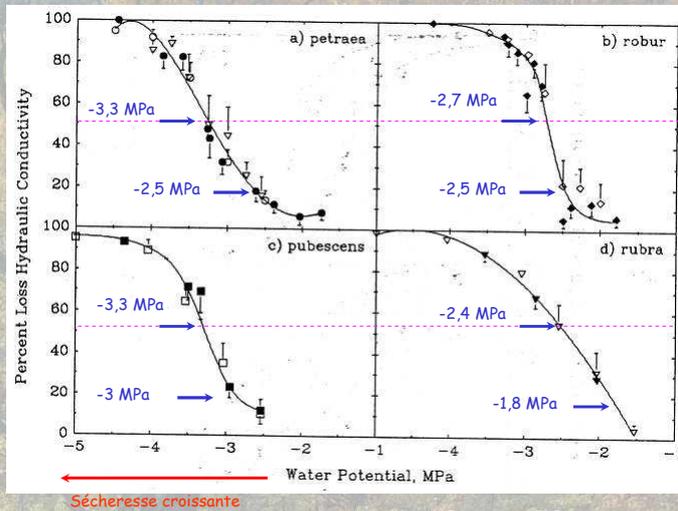
Embolie estivale... les mécanismes de protection sont multiples (Tyree et al. 1994):

- 1) redondance des éléments conducteurs
- 2) **segmentation hydraulique (pétiole, rameau)**
- 3) **régulation stomatique (feuille)**



Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

Embolie estivale... sensibilité différente des chênes

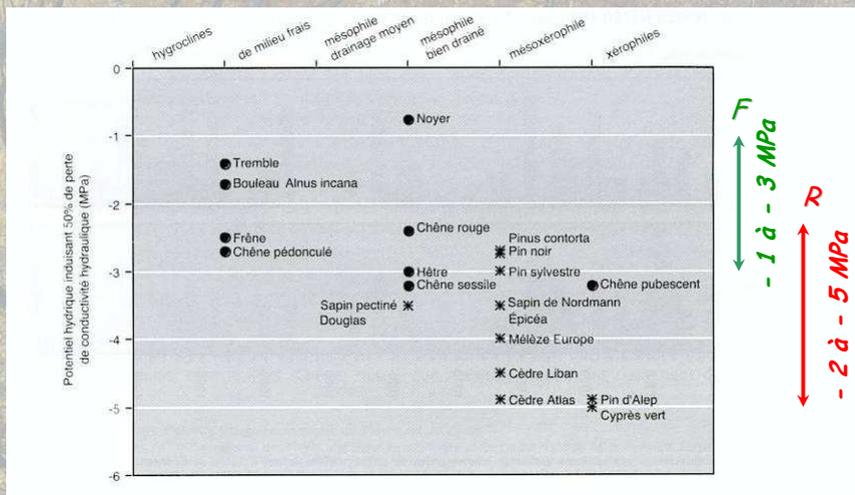


Courbes de vulnérabilité de différentes espèces de chênes (mesures sur pétioles) (Cochard *et al.* 1992). En l'absence de stress, l'embolie « naturelle » est de l'ordre de 10-20%

Vulnérabilité à la cavitation
CHR > CHP > CHS > CHPu

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

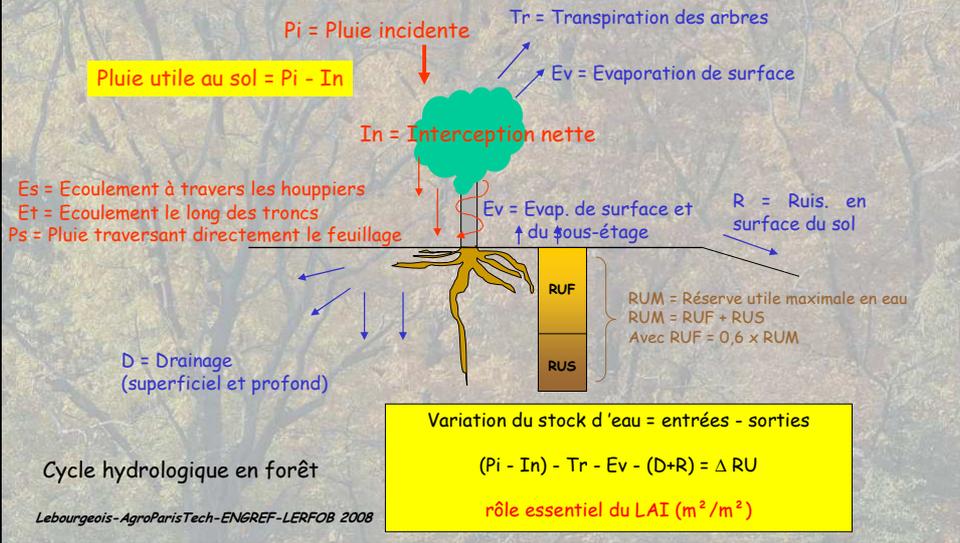
Cavitation et classement écologique des essences forestières



Bréda *et al.* 2004, RFF, vol 51, n°2, 109-131

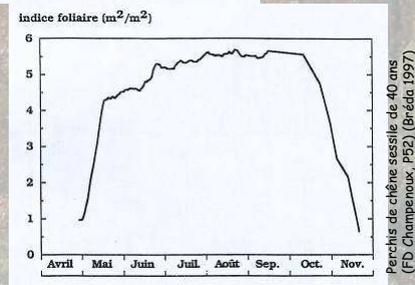
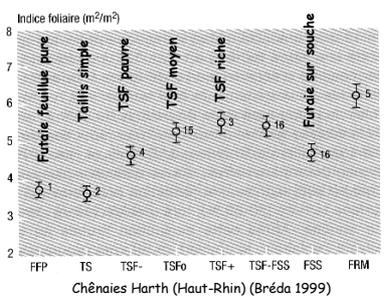
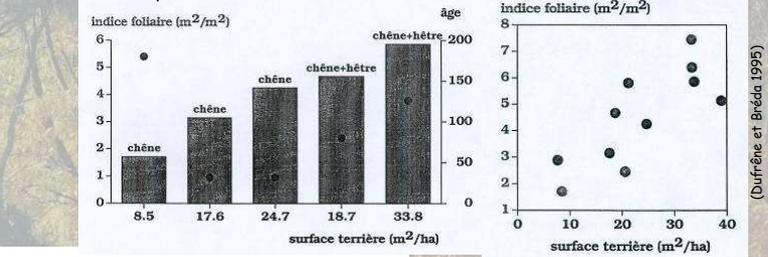
Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Un bilan hydrique a pour objectifs de suivre l'évolution temporelle de la réserve utile en eau du sol. Les termes du bilan hydrique sont : les entrées, les sorties et les réservoirs internes



Rôle essentiel de la surface foliaire (Leaf Area Index = LAI en m^2/m^2)

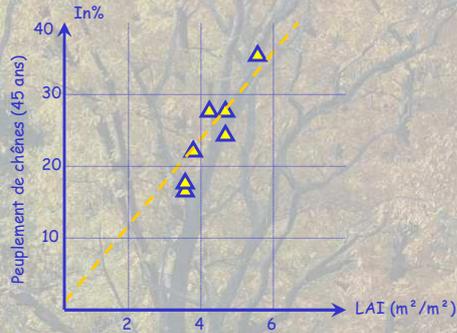
- valeurs et dynamique saisonnière
- intensité des pluies
- quantité totale



Rôle essentiel de la surface foliaire (Leaf Area Index = LAI en m²/m²)

- LAI { Interception des pluies • valeurs et dynamique saisonnière
 Transpiration • intensité des pluies
 • quantité totale

feuillus : 15 à 35%... En moyenne pour un peuplement adulte = 25%
 résineux : 25 à 50%... En moyenne pour un peuplement adulte = 35%



Interception totale :
 Intensité < 2 mm

Eau incidente Evaporation de surface

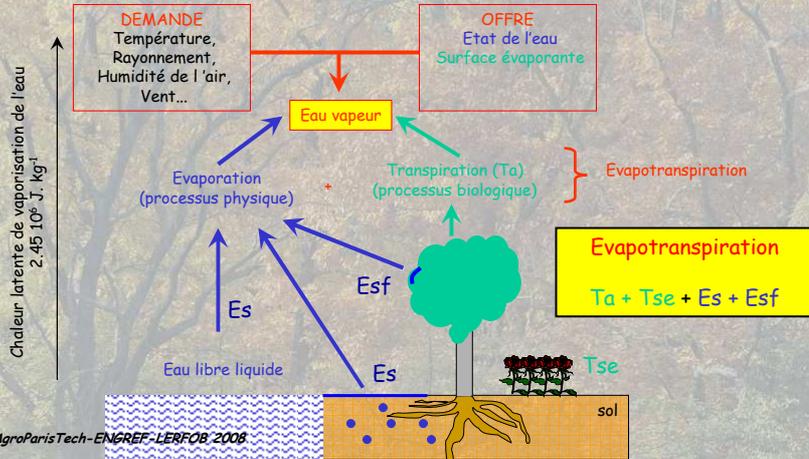


Estimation de « l'évapo-transpiration » des couverts forestiers

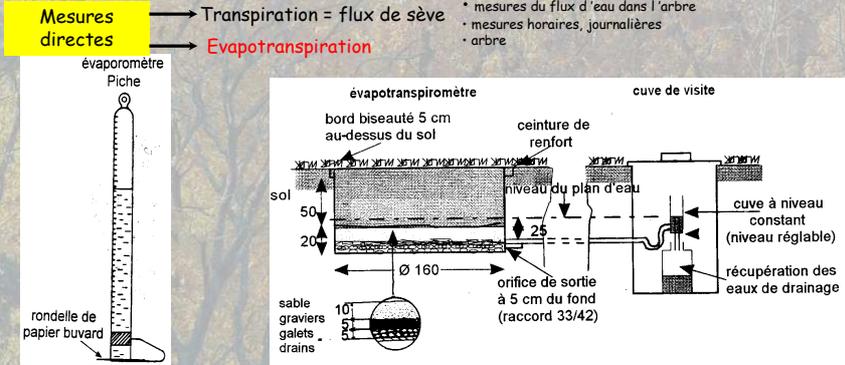
Mesures directes

- Transpiration = flux de sève • mesures du flux d'eau dans l'arbre (quantitatif)
- Evapotranspiration • mesures horaires, journalières
- arbre

L'évapotranspiration (ET) est le phénomène qui combine les pertes en eau
 • par EVAPORATION directe d'eau liquide (eau libre ou eau du sol)
 • par TRANSPIRATION des couverts végétaux



Estimation de « l'évapo-transpiration » des couverts forestiers



L'évaaporomètre Piche est constitué par une éprouvette renversée de 20 à 30 cm de long qui est fermée à sa base par une rondelle de papier buvard (surface évaporante: 13 cm²). Le tube est directement gradué depuis son sommet en dixièmes de millimètres d'eau évaporée.

Les lysimètres à drainage.

Leur principe de base fait appel au bilan hydrique d'un système de dimensions finies, constitué par une tranche de sol et le couvert végétal qui la surmonte. Si la tranche de sol est placée dans une cuve qui empêche le ruissellement en surface (bord dépassant la surface du sol de 5 cm) ainsi que les échanges latéraux en profondeur, et si le stock d'eau est reconstitué à chaque mesure, on peut alors écrire:
 $ETM = P + I - D$

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Estimation de « l'évapo-transpiration » des couverts forestiers

Mesures indirectes de l'évapotranspiration → Formules mathématiques

simplicité		Pas de temps	Variables d'entrées	
+++	Terrain	Thorntwaite (1948)	mensuel - annuel	T°C
		Turc (1955)	décadaire - mensuel...	T°C et Rg
		Hargreaves (1985)	Jour, décade, mois...	T°C et Rg
	Recherche	Penman (1955)	horaire, journalier...	T, Rg, Vent, Dsat
---		Penman-Monteith (1973)	horaire, journalier...	T, Rg, Vent, Dsat flux convectif conductance du couvert

	Nom	Dispo en eau	Résistances
ETP	Potentielle	non limitante	nulles
ETM	Maximale	non limitante	faibles
ETR	Réelle	limitante	fortes

$ETP \geq ETM > ETR (=Tr)$

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Relation Transpiration (T) et ETP dans une parcelle forestière

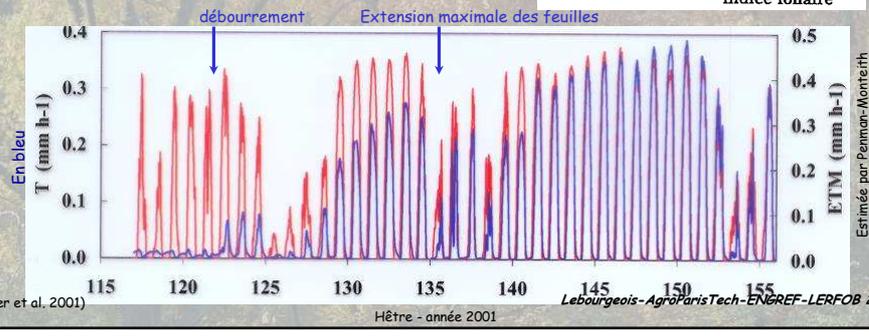
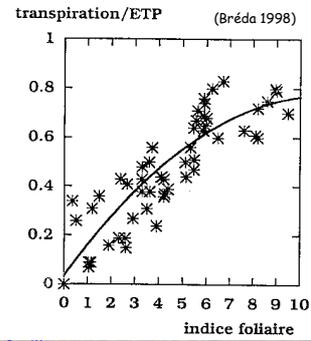
Grandeurs de l'évapotranspiration (Saugier 2001)

- Forêt amazonienne : 1300 à 1500 mm/an
- Afrique de l'Ouest : 950 à 1425 mm/an
- Valeurs max observées (nord du Burkina-Faso) : 2500 à 3000 mm/an

• France métropolitaine : 400 à 700 mm/an

En l'absence de sécheresse édaphique, la transpiration...

- Dépend du Rayonnement global (W/m^2)
- Dépend de la surface évaporatrice (LAI)
- Représente 70 à 90% de l'évapotranspiration (peupl. Adulte)



(Granier et al. 2001) Hêtre - année 2001 Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Relation Transpiration (T) et ETP dans une parcelle forestière

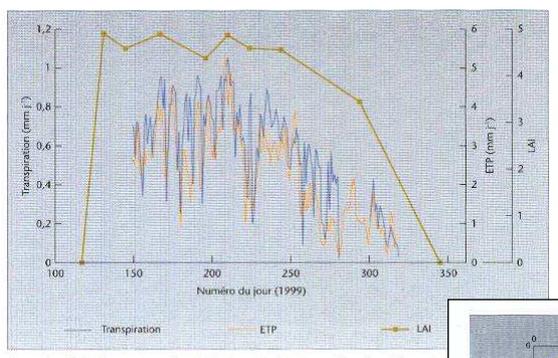


Figure 5 - Evolutions saisonnières de la transpiration journalière des chênes, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du LAI total des feuillus.

(Vincke 2004)

(j = 140) attaque chenille + épisode sec (j = 180)
T/ETP = 0.1 à 0.3

Rédoxisol
Limon-argileux
Plancher à 30 cm
nappe hivernale

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Chênes pédonculés de 110 ans
107 tiges/ha
 $G = 13.8 m^2/ha$
 $H_0 = 23.7 m$
Dépérissement depuis 1989

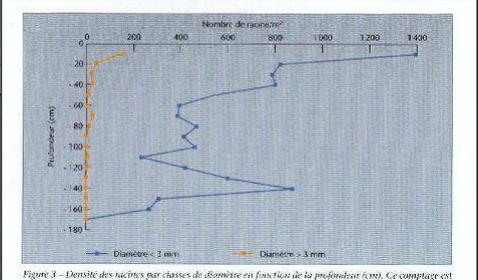
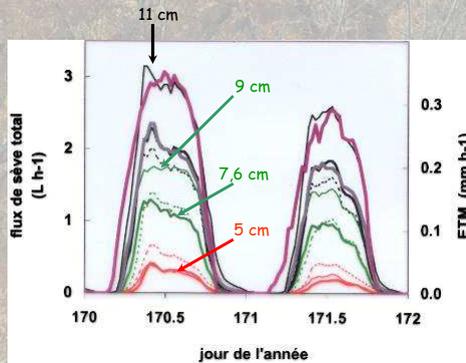
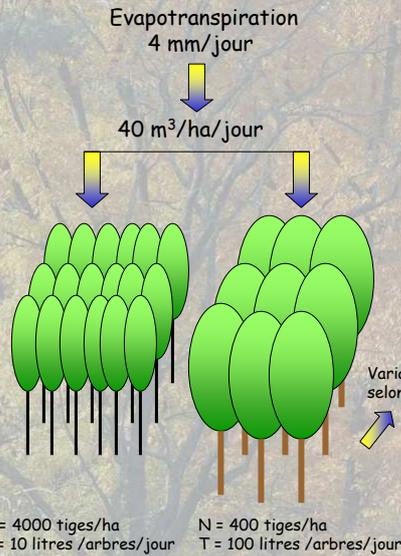


Figure 6 - Densité des racines par classes de diamètre en fonction de la profondeur (cm). Ce comptage est effectué sur la face verticale d'une tranche.

Quelle est la quantité d'eau transpirée par un arbre ?

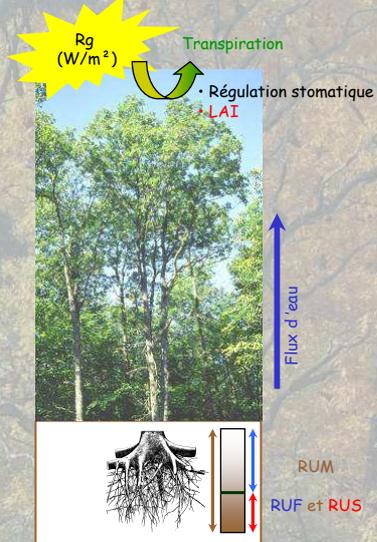
Hêtre - Forêt de Hesse
(Granier *et al.* 2001)



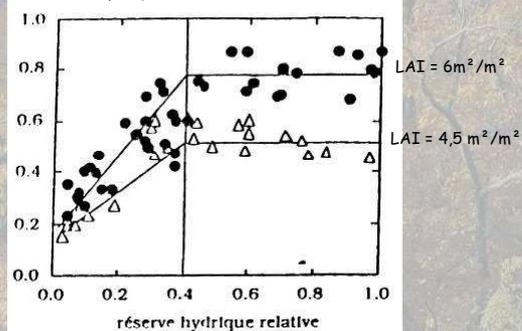
Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Relation Transpiration T/ETP et réserve utile

Demande climatique (ETP)



Relation entre le rapport T/ETP, le LAI et la réserve hydrique du sol (Bréda 1994, Granier *et al.* 1995)

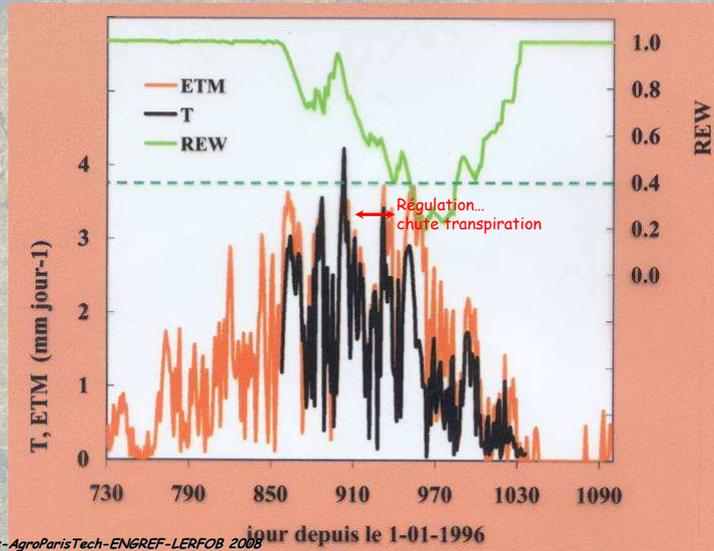


La régulation stomatique intervient quand la réserve hydrique du sol atteint 40% de la RUM

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Relation Transpiration T/ETP et réserve utile... effet du seuil de 40%

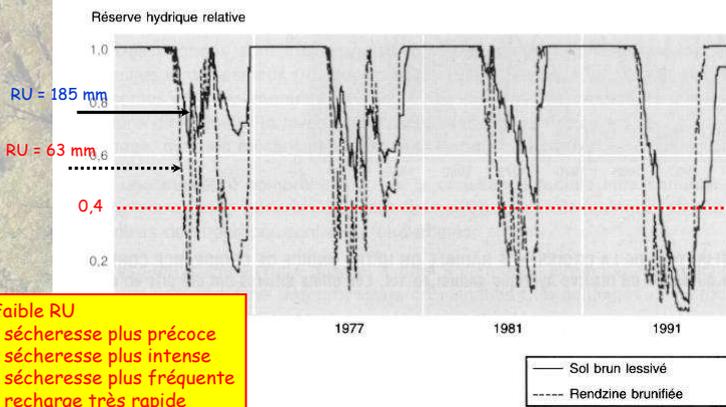
Hêtre - Forêt de Hesse - année 1999 (Granier *et al.* 2001) -
 Modèle de Bilan hydrique itératif à pas de temps journalier (Granier *et al.* 1999)



Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

Bilan hydrique d'une parcelle forestière... effet de la réserve utile

SIMULATION DE LA RÉSERVE EN EAU RELATIVE POUR DEUX TYPES DE SOL DE LA FORÊT DE HAYE (MEURTHE-ET-MOSELLE), DANS LE CAS D'UNE HÊTRAIE :
 sol brun lessivé à 185 mm de réserve utile et 63 mm pour la rendzine brunifiée.
 Exemple de quatre années à caractéristiques climatiques différentes : 1972, 1977, 1981 et 1991
 Données météorologiques du poste Météo-France de Tomblaine (Meurthe-et-Moselle)



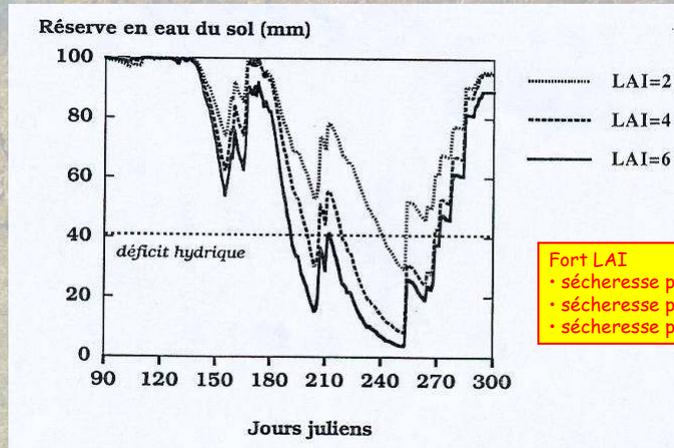
- Faible RU**
- sécheresse plus précoce
 - sécheresse plus intense
 - sécheresse plus fréquente
 - recharge très rapide

— Sol brun lessivé
 ---- Rendzine brunifiée

(Granier *et al.* 1995)

Lebourgeois - AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008

Bilan hydrique d'une parcelle forestière... effet de la surface foliaire

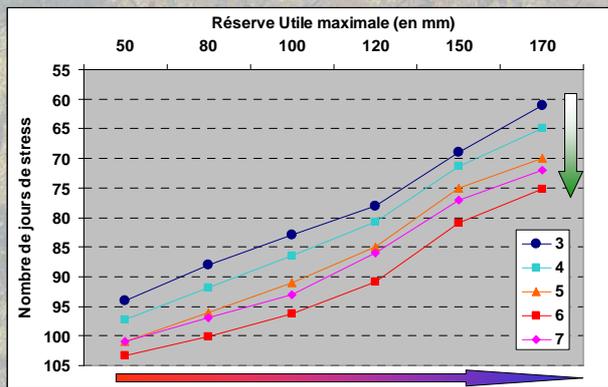


(Bréda 1994)

Bilan hydrique d'une parcelle forestière... RU et LAI

Nancy: 1950 à 2007 RUM: 50 à 170 mm LAI: 3 à 7 m²/m² SV: mai à oct.

(Lebourgeois, non publié)



Plus LAI augmente...
Plus Njs augmente

3 à 4: +4%
 3 à 5: +10%
 3 à 6: +16%

La réduction est d'autant plus forte que le LAI est faible

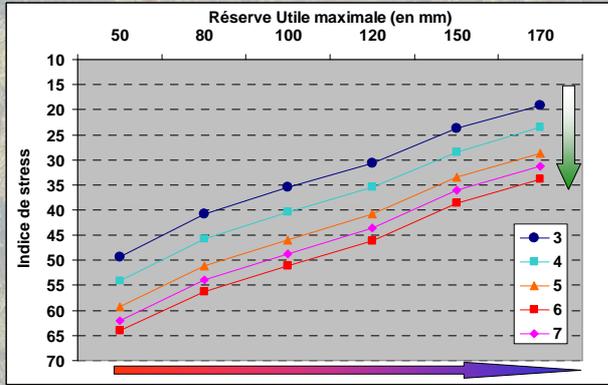
Plus RUM augmente... plus Njs diminue

50 à 100 mm => -10%
 50 à 150 mm => -25%
 100 à 150 mm => -20%

	LAI 3-4	LAI 6-7
50 à 100	-11%	-7%
50 à 150	-27%	-23%
100 à 150	-17%	-16%

Bilan hydrique d'une parcelle forestière... RU et LAI

Nancy: 1950 à 2007 RUM: 50 à 170 mm LAI: 3 à 7 m²/m² SV: mai à oct.



Plus LAI augmente...
Plus Ind augmente

3 à 4: +16%
3 à 5: +33%
3 à 6: +50%

La réduction est d'autant plus forte que le LAI est faible

	LAI 3-4	LAI 6-7
50 à 100	-27%	-21%
50 à 150	-50%	-42%
100 à 150	-31%	-26%

Plus RUM augmente... plus Ind diminue

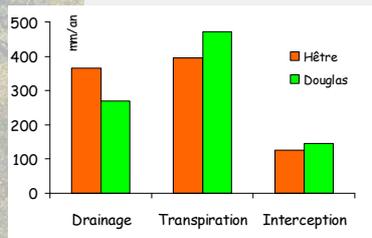
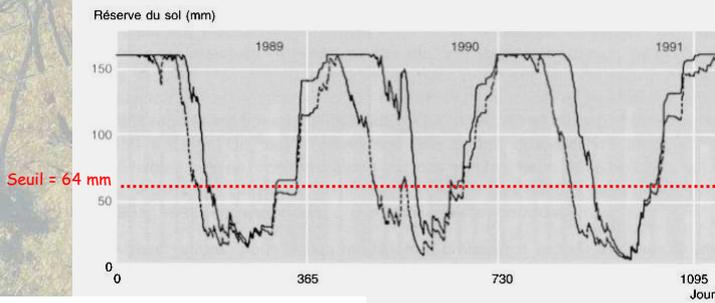
50 à 100 mm => -25%
50 à 150 mm => -45%
100 à 150 mm => -30%

Lebourgeois - AgroParisTech - ENGREF - LERFOB 2008

Bilan hydrique d'une parcelle forestière... effet de l'espèce

SIMULATION DE LA RÉSERVE HYDRIQUE DU SOL
pour un peuplement feuillu (Hêtres) et résineux (Douglas) lors de trois années successives, pour une hypothèse de réserve utile de 160 mm

Données climatiques du poste Météo-France de Tomblaine (Meurthe-et-Moselle)



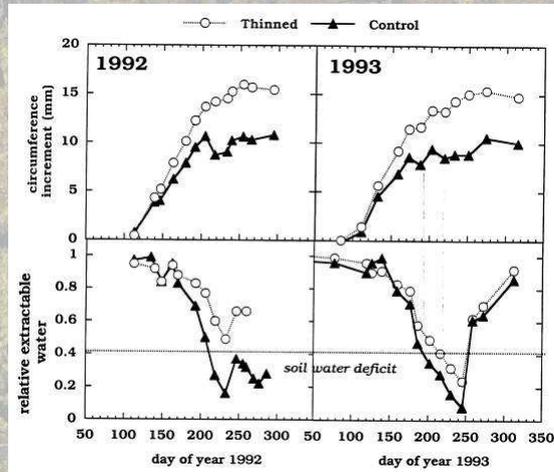
Douglas

- transpiration plus intense
- diminution plus rapide de la RU
- sécheresse plus précoce
- sécheresse plus longue
- ⇒ aiguilles persistantes... interception plus forte et transpiration toute l'année

(Granier et al. 1995)

Bilan hydrique d'une parcelle forestière... effet d'une éclaircie (hiver 1991)

Haut perchis de chêne sessile de 43 ans - Forêt de Champenoux (54) (Bréda *et al.* 1994)



	Tiges/ha	m ² /ha	Dia (cm)
Témoins	3352	24,6	17,1
Eclaircis	3077	17,6	16,1
	(-23%)	(-35%)	

Jour 225 :

Control : $\Psi_b = -0,25$ Mpa

Thinned : $\Psi_b = -0,9$ MPa

Jour 225 :

Control : $\Psi_b = -0,8$ Mpa

Thinned : $\Psi_b = -1,1$ MPa

Lebourgeois-AgroParisTech-ENGREF-LERFOB 2008