

Aperçu du fonctionnement hydrique et hydraulique des arbres

I. Que se passe-t-il en cas de sécheresse ?

II. Que sait-on de la sensibilité des essences forestières au climat ?

F. Lebourgeois

*Enseignant-chercheur
AgroParisTech-Engref*

Première partie

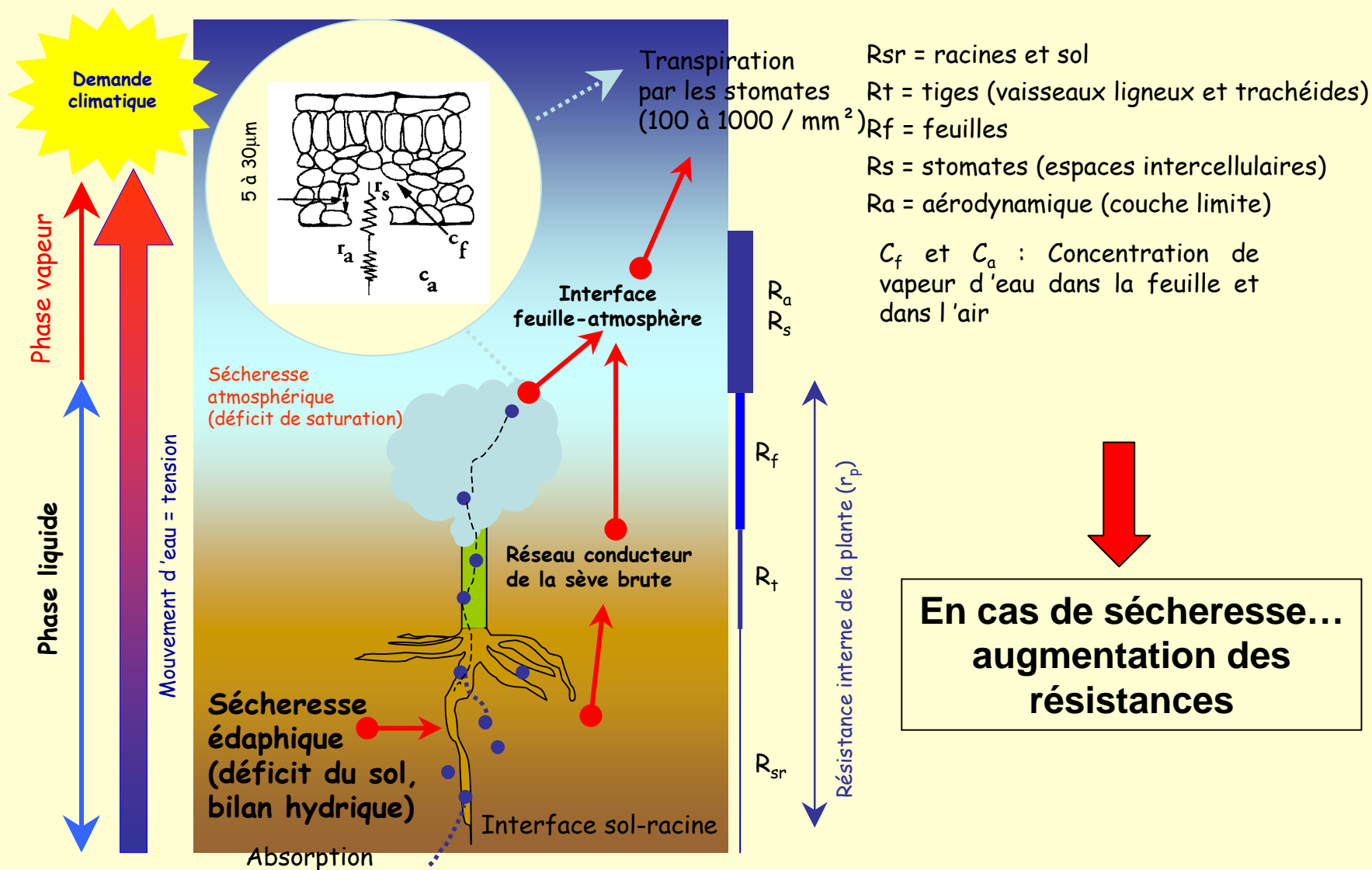
Que se passe-t-il en cas de sécheresse ?

I. Le système SVA

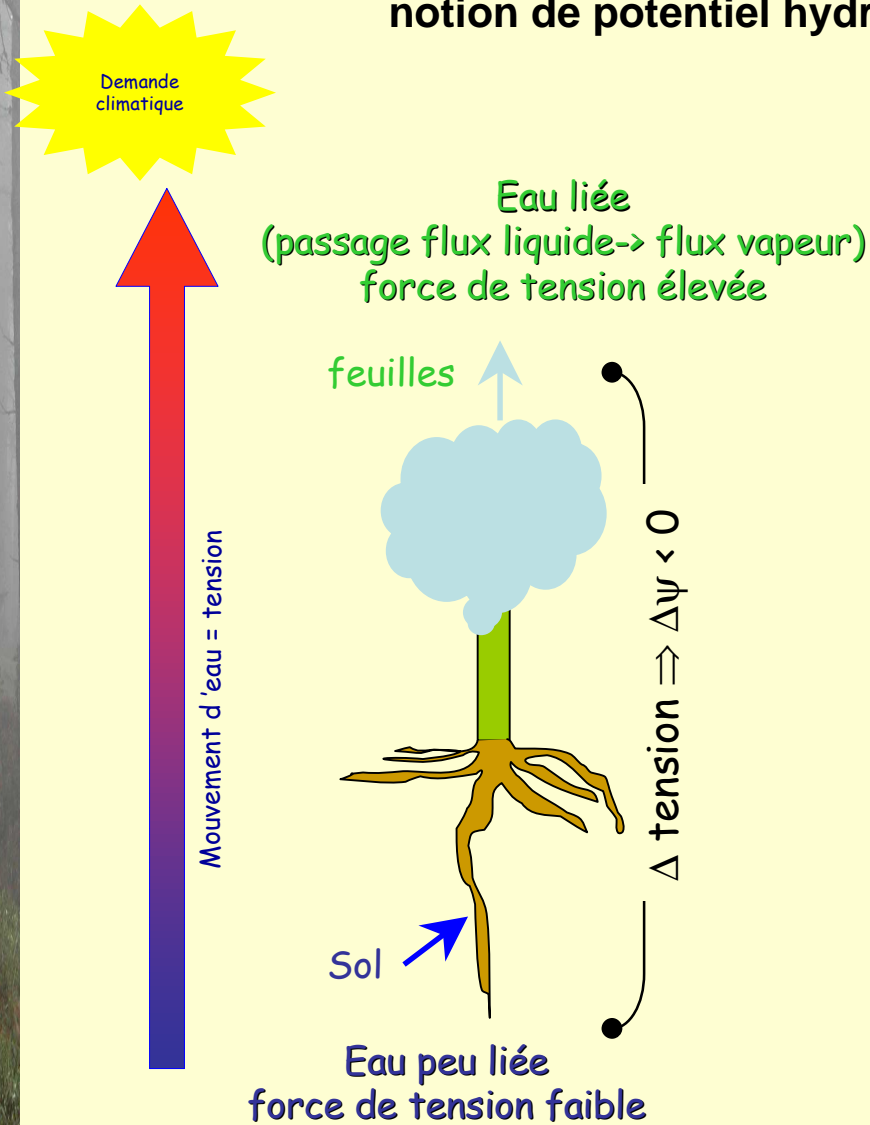
II. Les mécanismes de contrôle des pertes en eau... le dilemme des plantes « boire ou manger , il faut choisir ! »

III. Comment définir un bilan hydrique

I. Le système SVA: Sol-Végétation-Atmosphère



I. Le système SVA: Comment caractériser ces résistances... notion de potentiel hydrique



Analogie avec la loi d'Ohm (1826)

$$U = RI$$

$U = \Delta$ potentiel électrique

$R =$ résistance

$I =$ intensité

$$\underbrace{U}_{\Psi_{\text{sol}} - \Psi_{\text{feuille}}} = \underbrace{R}_{\frac{1}{g_L}} \underbrace{I}_{x T}$$

g_L : Conductance hydraulique spécifique
entre le sol et les feuilles ($\text{mmol}/\text{m}^2/\text{s}/\text{Mpa}$)

$T =$ Transpiration ($\text{mmol}/\text{m}^2/\text{s}$)

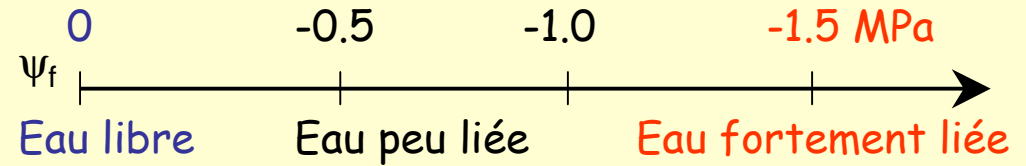
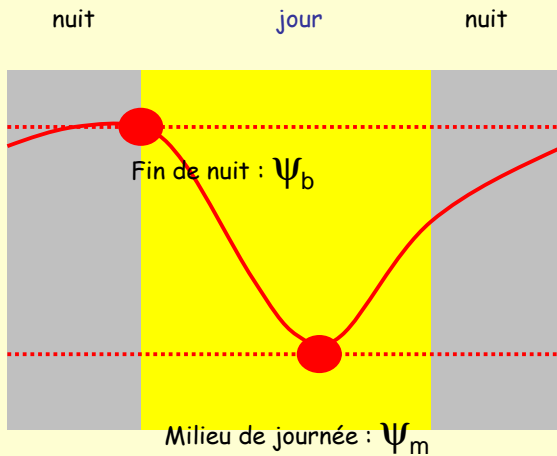
I. Le système SVA: Comment caractériser ces résistances... notion de potentiel hydrique

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

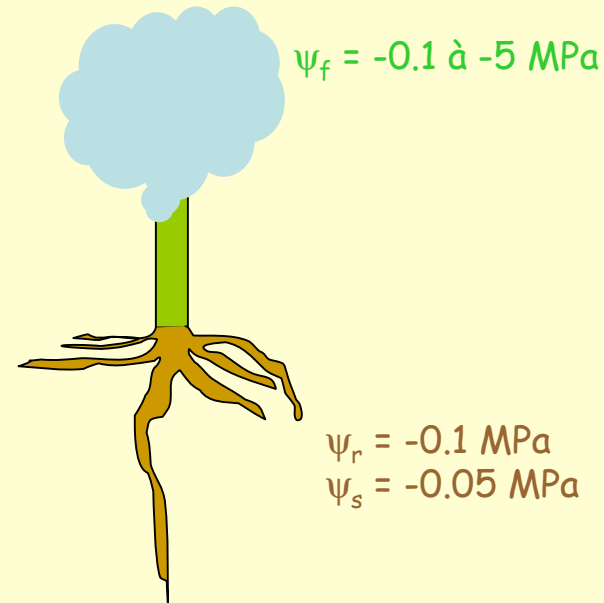
$T = 0$ alors $\Psi_f = \Psi_s$
 $\Rightarrow \Psi_b$

$T=0$
 fin de nuit

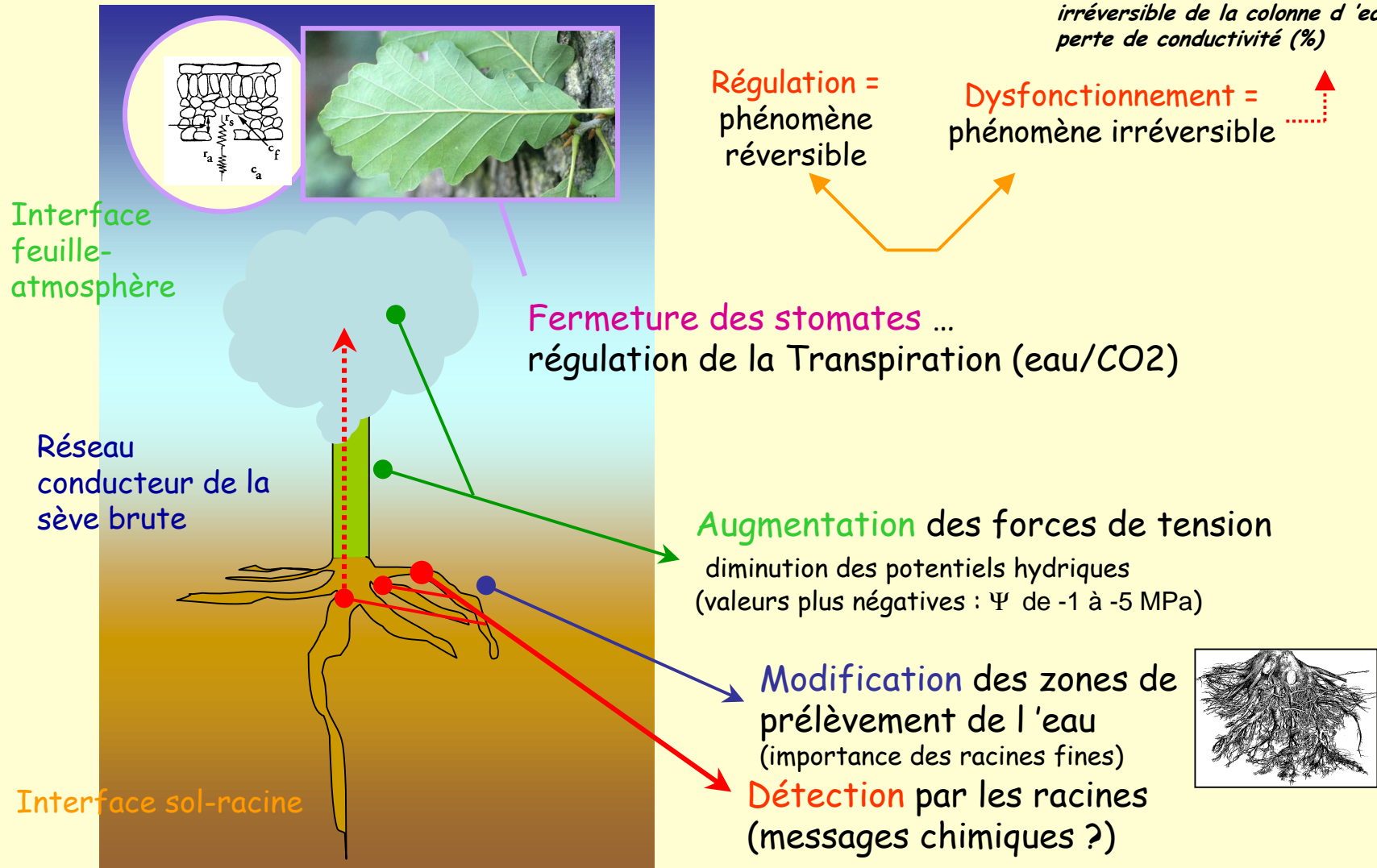
$T=0$
 sécheresse (Ψ_{bc})



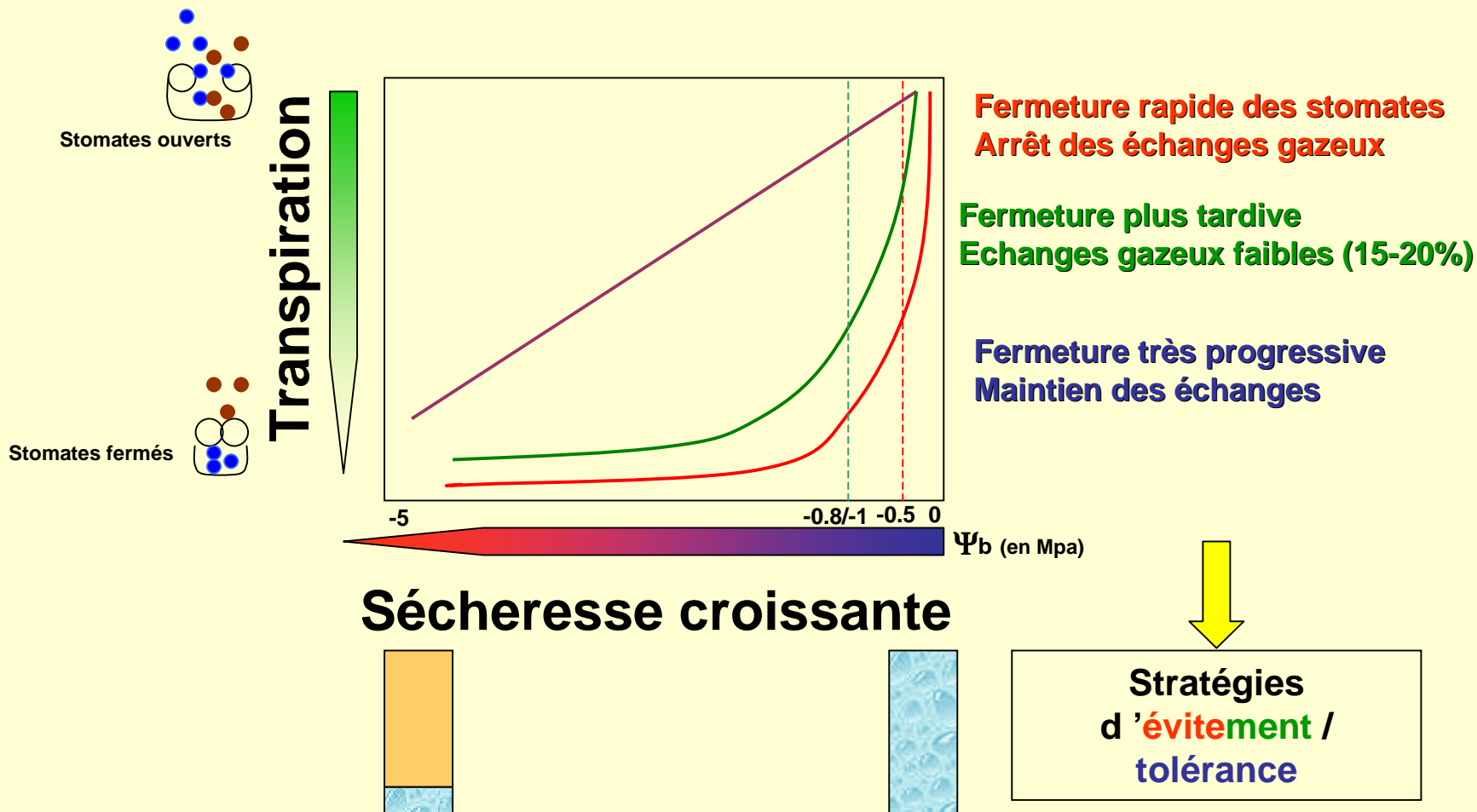
1 bar = 0,1 MPa = force de 1 kg/cm²



II. Les mécanismes de contrôle des pertes en eau... « boire ou manger »

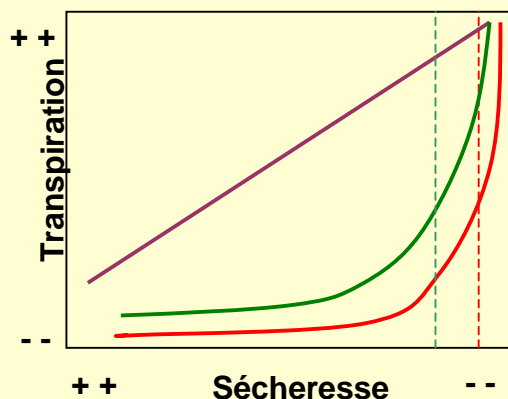


II. Les mécanismes de contrôle des pertes en eau... « boire ou manger »... les différentes stratégies de régulation



II. Les mécanismes de contrôle des pertes en eau...

« boire ou manger »... les différentes stratégies de régulation (d'après Aussenac 1973)



Fermeture rapide des stomates

Arrêt des échanges gazeux ($\Psi_{bc} = -1.5$ à -2 Mpa)

- Les pins (*laricios, sylvestre, maritime, noir...*)
- Certains sapins méditerranéens

Fermeture plus tardive ($\Psi_{bc} = -2$ à -4 Mpa)

Echanges gazeux faibles (15-20%)

- Douglas, Epicéa, Sapin pectiné, Sapin grandis
- Hêtre, Chênes sess. et péd

Fermeture très progressive

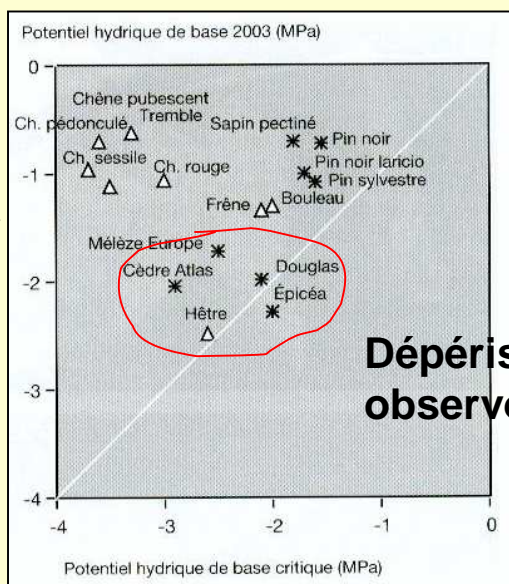
Maintien des échanges ($\Psi_{bc} = -2$ à -4 Mpa)

- Cèdres, Pin Alep...

- Chênes vert, pubescent, kermès...

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

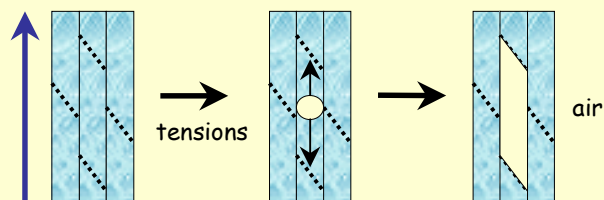
Arboretum d'Amance (rédoxisol)
Mesures fin août 2003 après la canicule



Dépérissements observés



II. Les mécanismes de contrôle des pertes en eau... « boire ou manger »... les seuils de dysfonctionnement



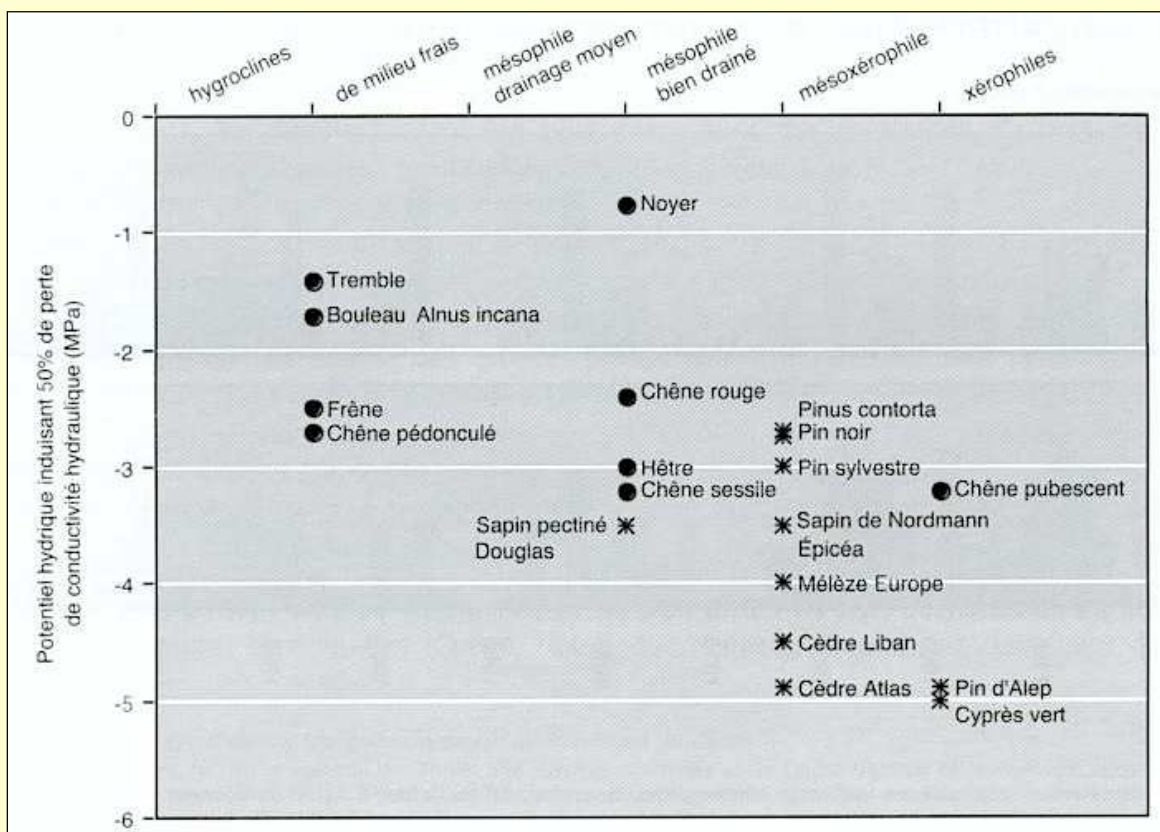
Rupture de la colonne d'eau...

- Cavitation (détection acoustique)

- Embolie (approche hydraulique)

(Cochard 1991, Lemoine 2000)

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

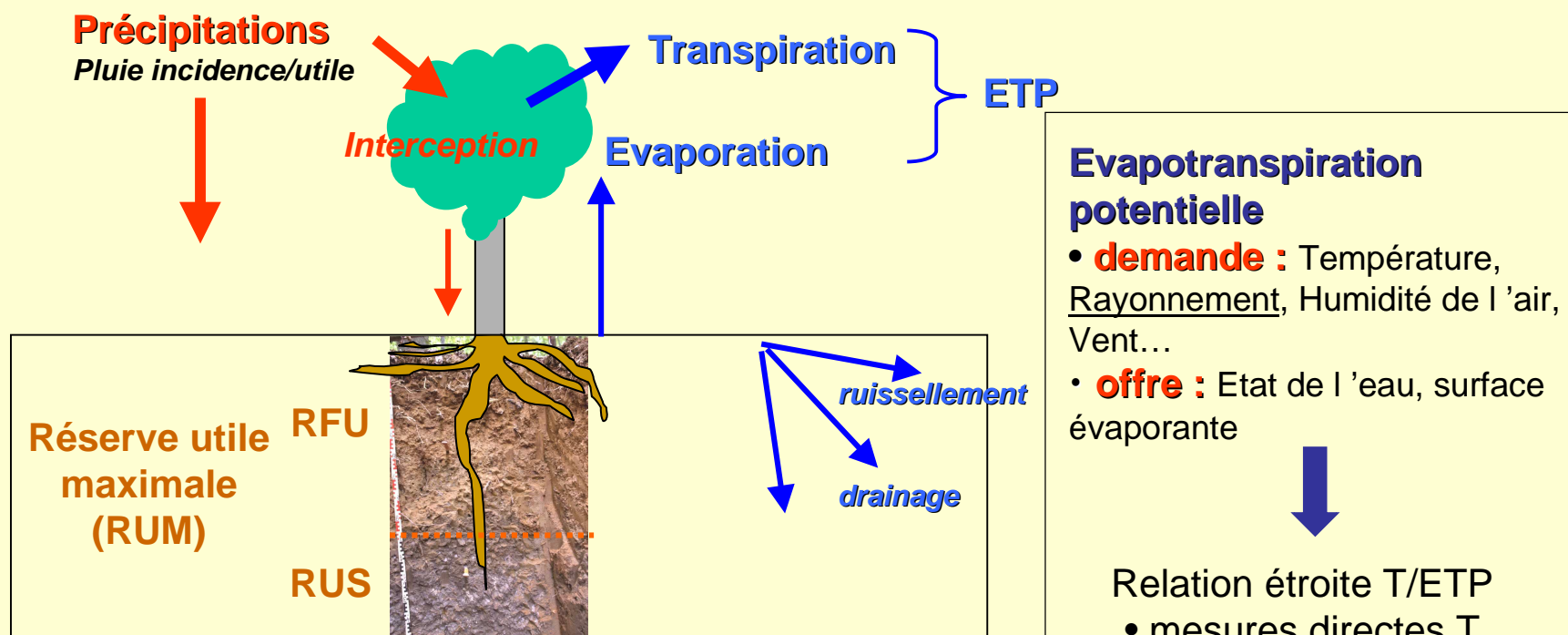


Feuillus
- 1 à - 3 MPa

Résineux
- 2 à - 5 MPa

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

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**



Variation du stock d'eau = entrées - sorties

$$\Delta RU = (P_i - I_n) - Tr - Ev - (D+R)$$

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

Les formules mathématiques d'estimation de l'ETP

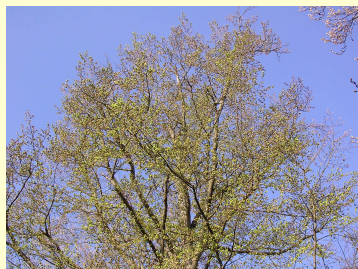
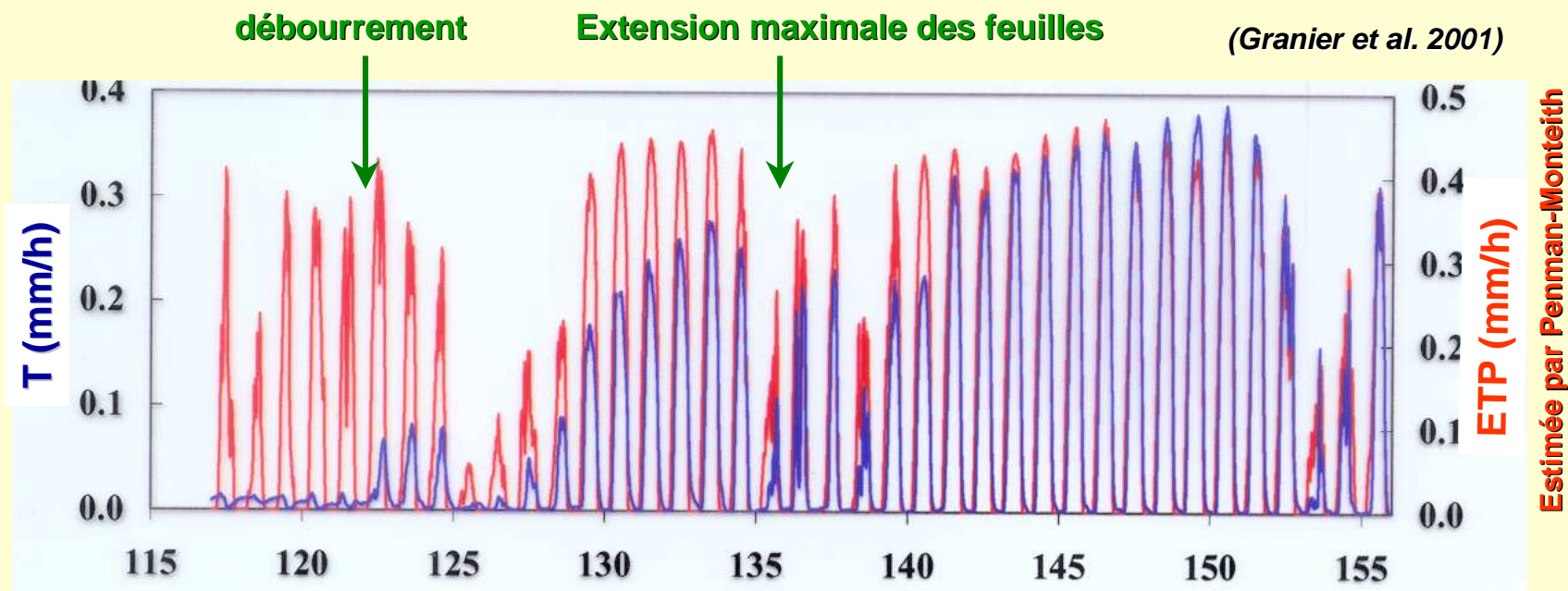
simplicité		Pas de temps	Variables d'entrées	
+++	Terrain	Thorntwaite (1948)	mensuel - annuel	T°C
		Turc (1955)	décadaire - mensuel...	T°C et Rg
		Hargreaves (1985)	Jour, décade, mois...	T°C et Rg
	Recherche	Penman (1955)	horaire, journalier...	T, Rg, Vent, Dsat
---		Penman-Monteith (1973)	horaire, journalier...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

Généralement ETR (=réelle) < ETP

Lebourgeois F., Piedallu C. 2005. Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. Revue Forestière Française, 57, (4), 331-356.

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

Relation entre T et ETP dans une hêtraie de l'Est de la France



Hêtre - année 2001

En couvert fermé et sans stress hydrique

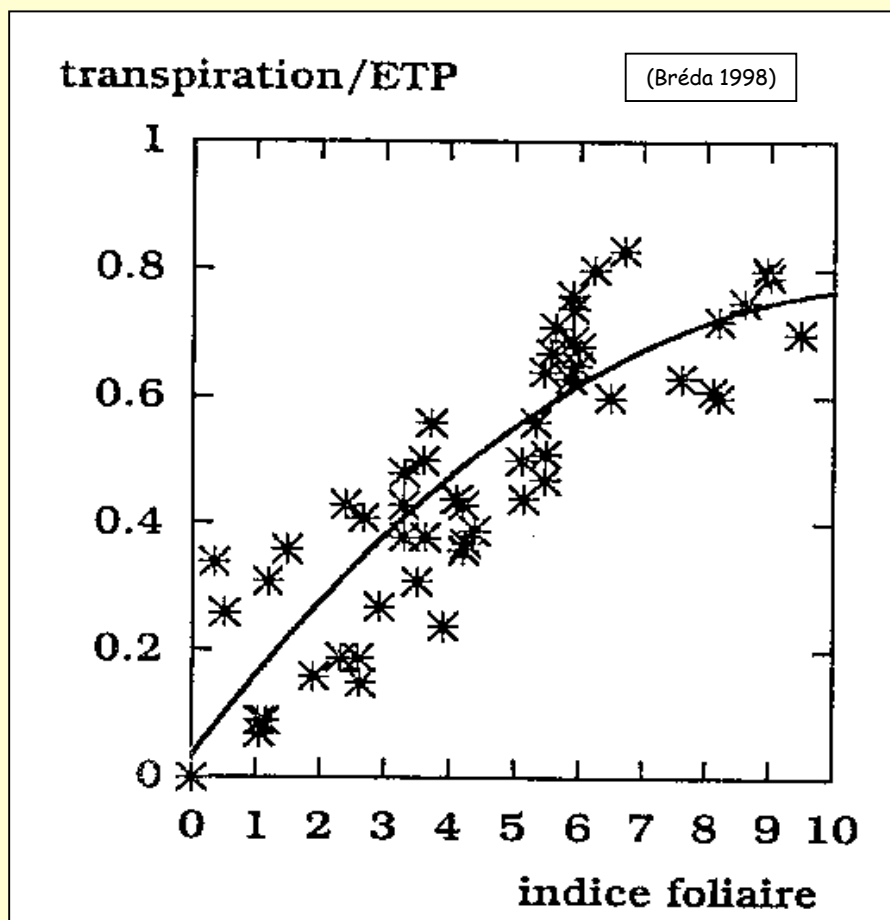
$T = 70 \text{ à } 90\% \text{ de ETP}$

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

Régulation du système... importance **des feuilles !**

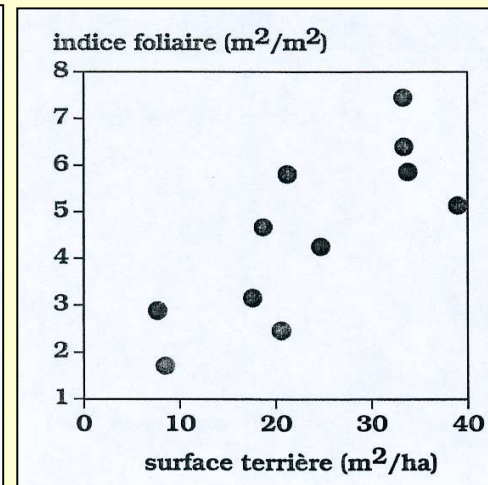
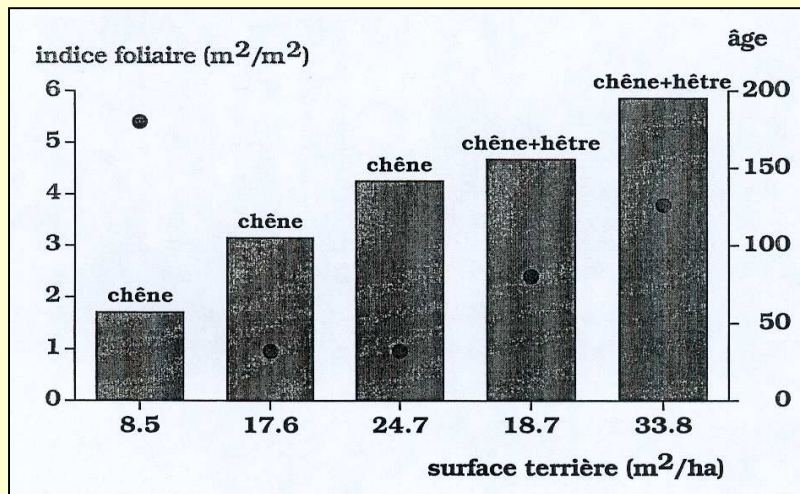
Rôle clé de la surface des feuilles

- interception
- transpiration

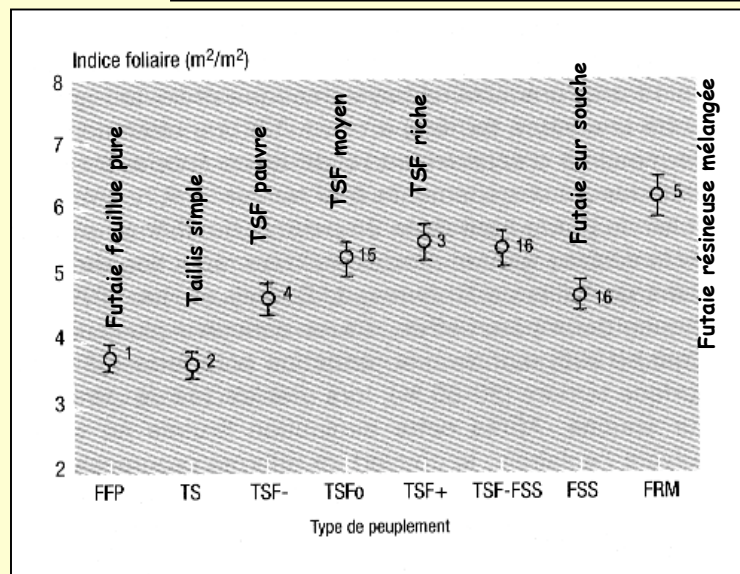


III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

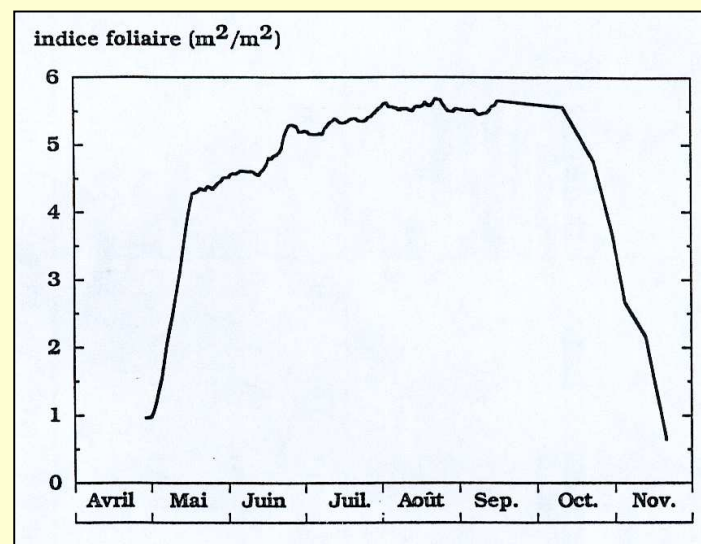
Régulation du système... importance **des feuilles !**



(Dufrêne et Bréda 1995)

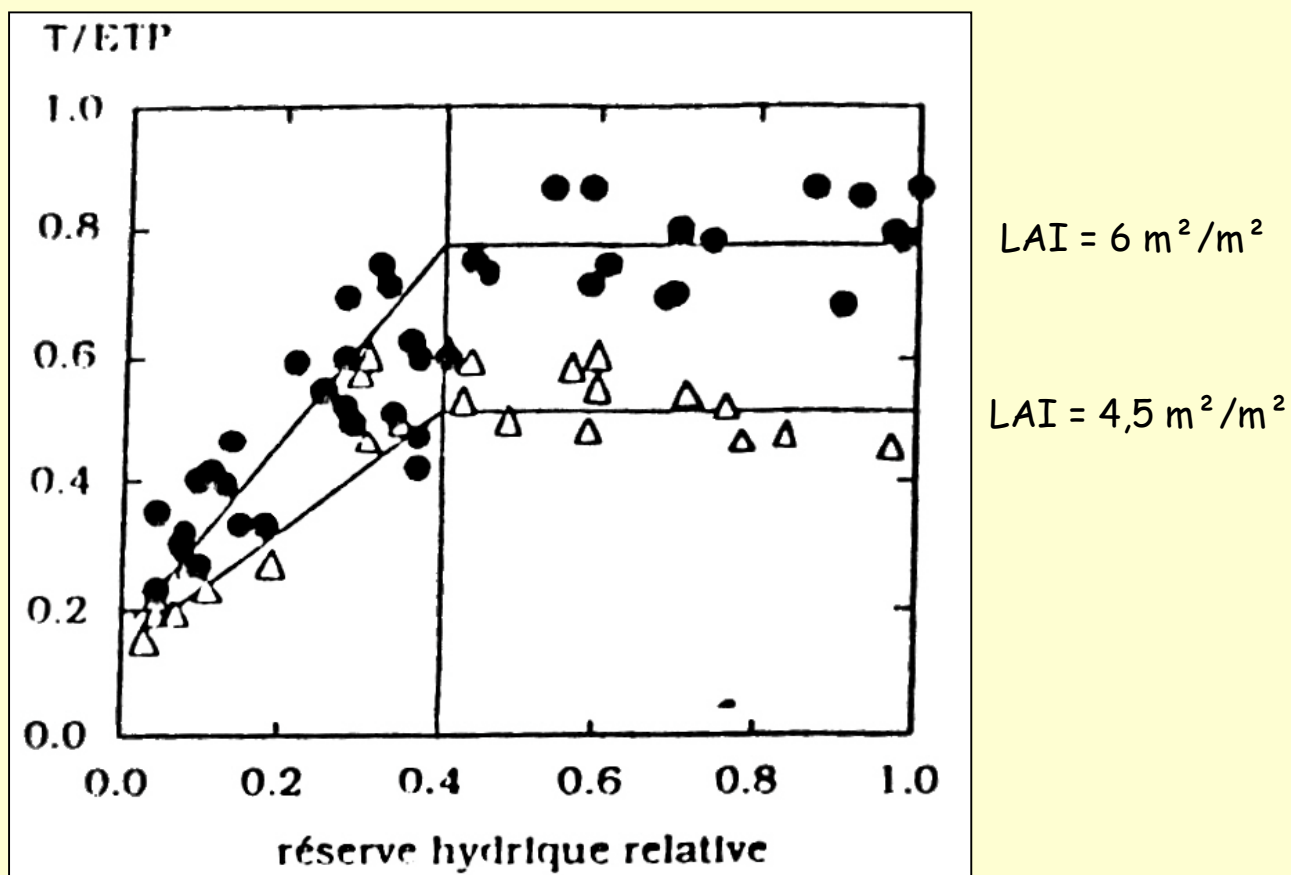


Chênaies Harth (Haut-Rhin) (Bréda 1999)



III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

Régulation du système... relation T/ETP, LAI et RU (Bréda 1994, Granier *et al.* 1995)

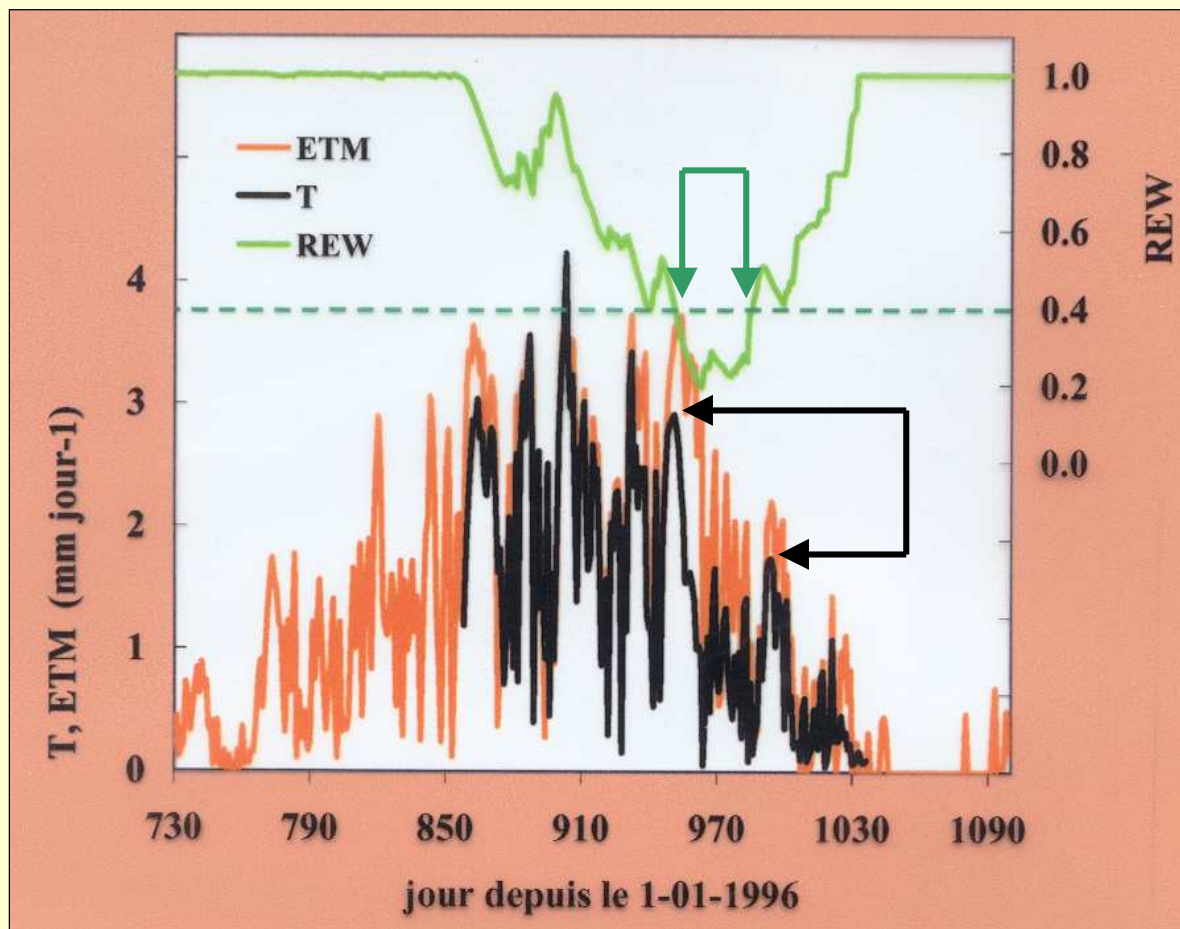


La régulation stomatique intervient quand la réserve hydrique du sol atteint 40% de la RUM (=RUS)

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

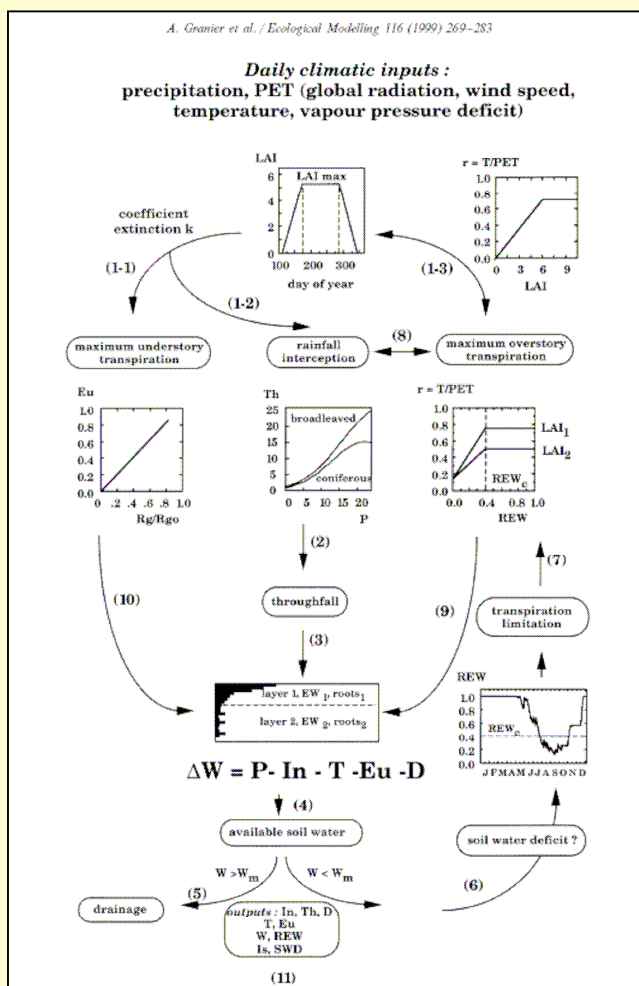
Hêtre - Forêt de Hesse - année 1999 (Granier *et al.* 2001) -

Modèle de Bilan hydrique itératif à pas de temps journalier (Granier *et al.* 1999)



III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

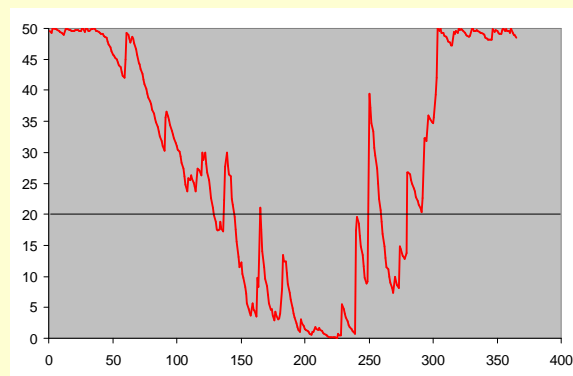
Effet du LAI et de la RUM sur la durée et l'intensité de la sécheresse



Modèle de Bilan hydrique journalier développé par Granier et al. (1999)

- Paramètres climatiques d'entrées
- Paramètres station et peuplements RUM, LAI, Sais. Vég.

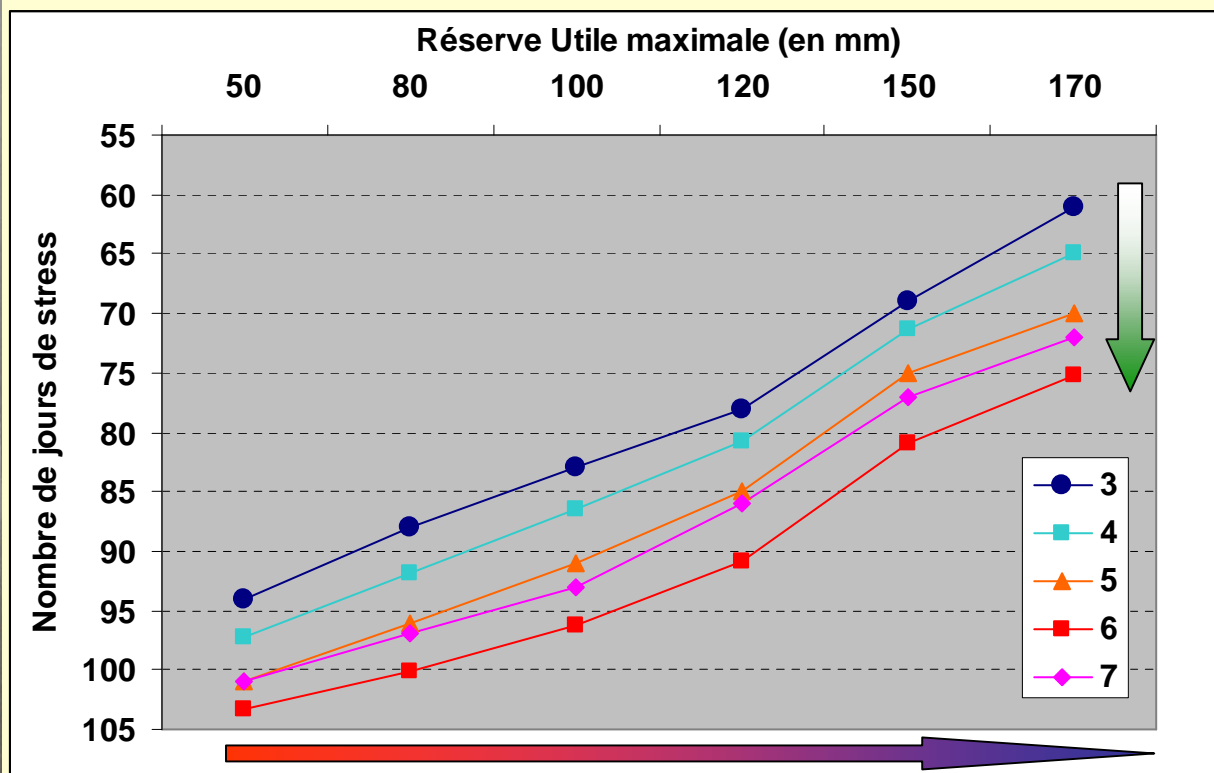
Évolution journalière de la RU



Nombre de jours de stress
(sous le seuil des 40% de RUM)
Indice de stress

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

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



**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**

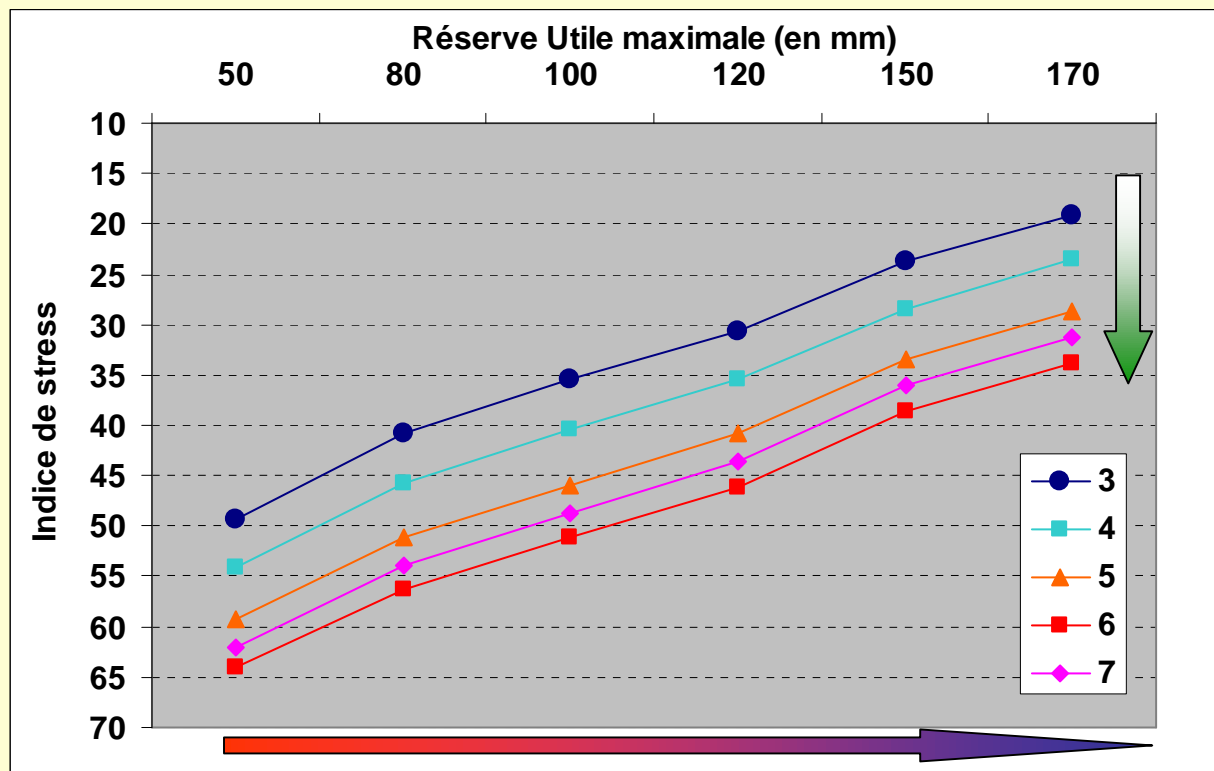
Plus RUM augmente... plus Njs diminue

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%

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

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**

Plus RUM augmente... plus Ind diminue

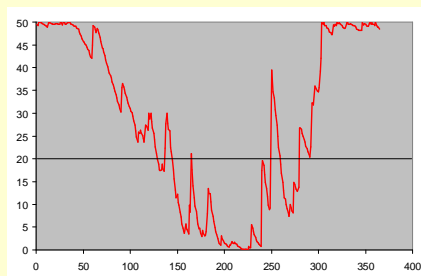
50 à 100 mm => -25%
50 à 150 mm => -45%
100 à 150 mm => -30%

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

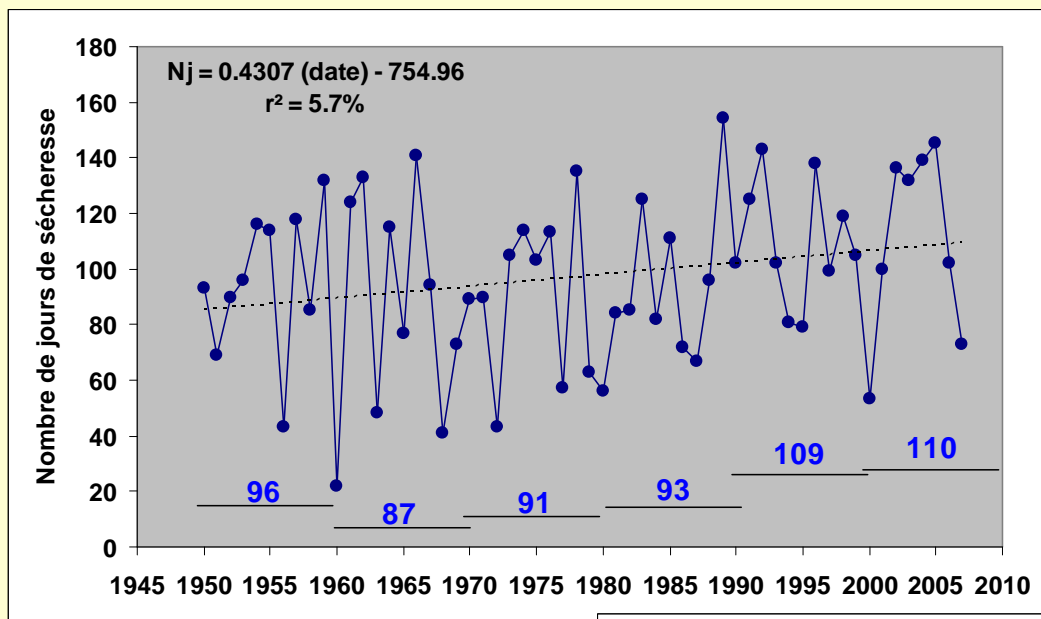
III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

Conclusions pour un peuplement de feuillus en Lorraine (Durée et intensité de la sécheresse)

	LAI 3-4		LAI 6-7	
50 à 100	-11%	-27%	-7%	-21%
50 à 150	-27%	-50%	-23%	-42%
100 à 150	-17%	-31%	-16%	-26%

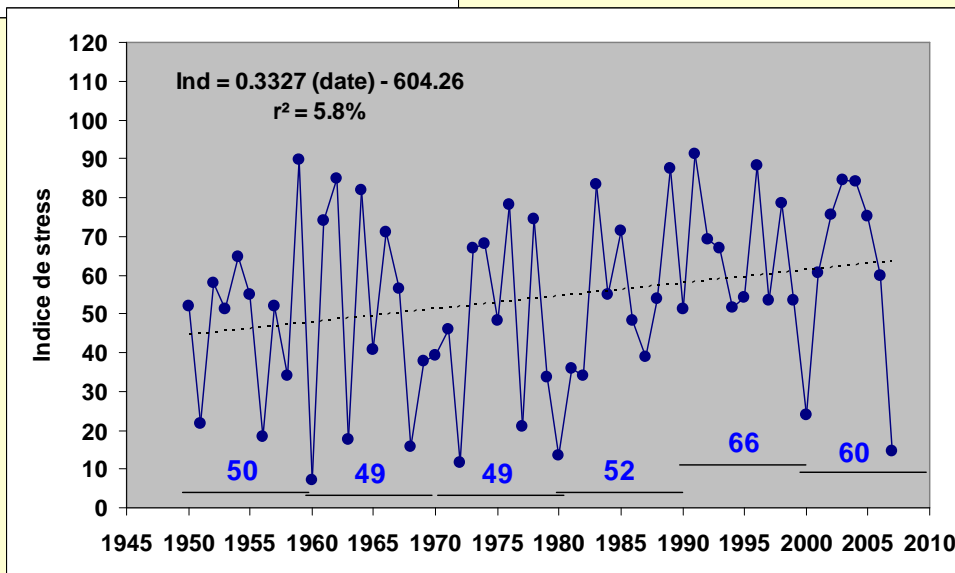


III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes



Evolution de la contrainte hydrique en lorraine...
 1950-2007

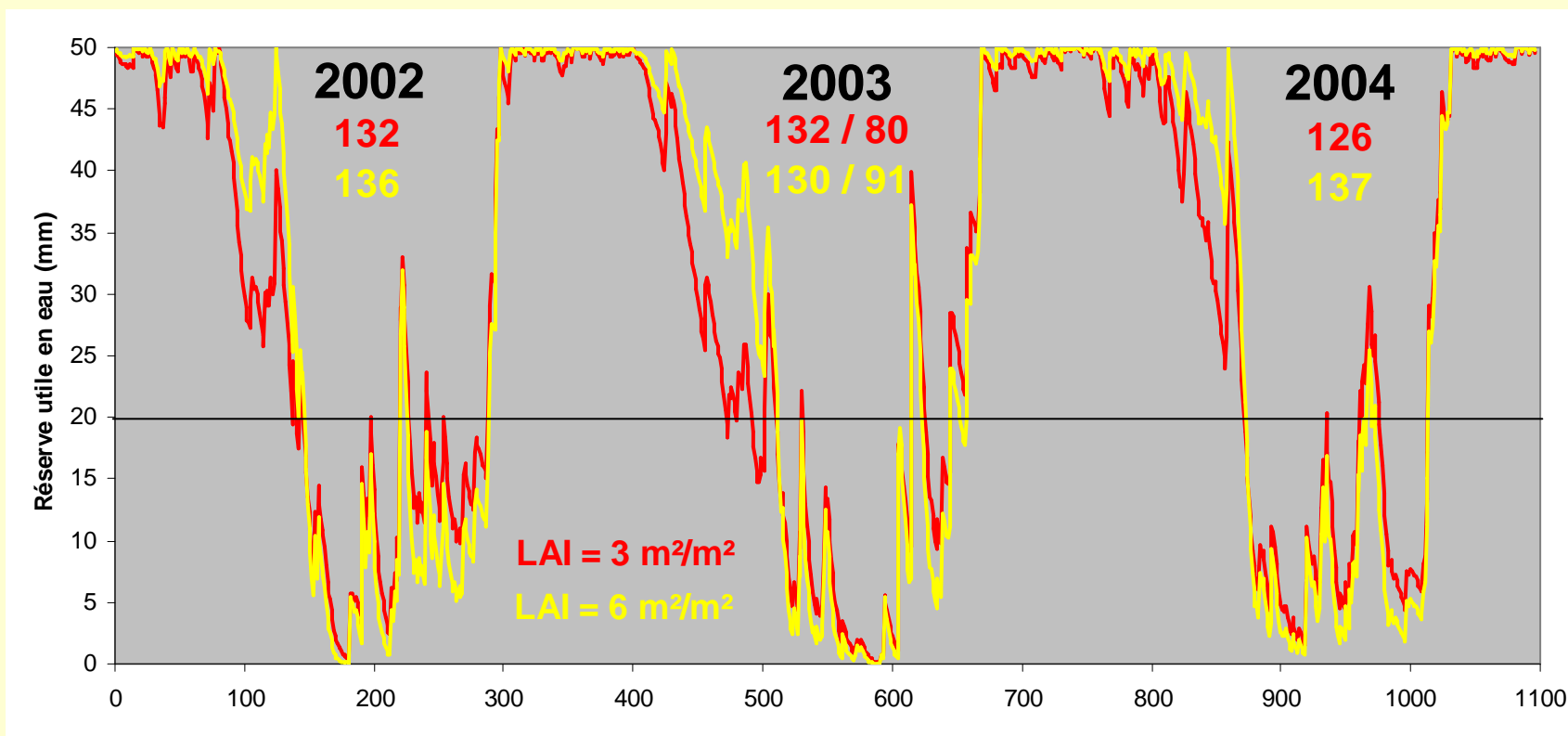
LAI = 7 m²/m²
 RUM = 80 mm
 Feuillus
 (Sais. Vég constante)



III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

LAI et sécheresse de 2003

RUM = 50 mm



- 4 jours

+ 2 jours

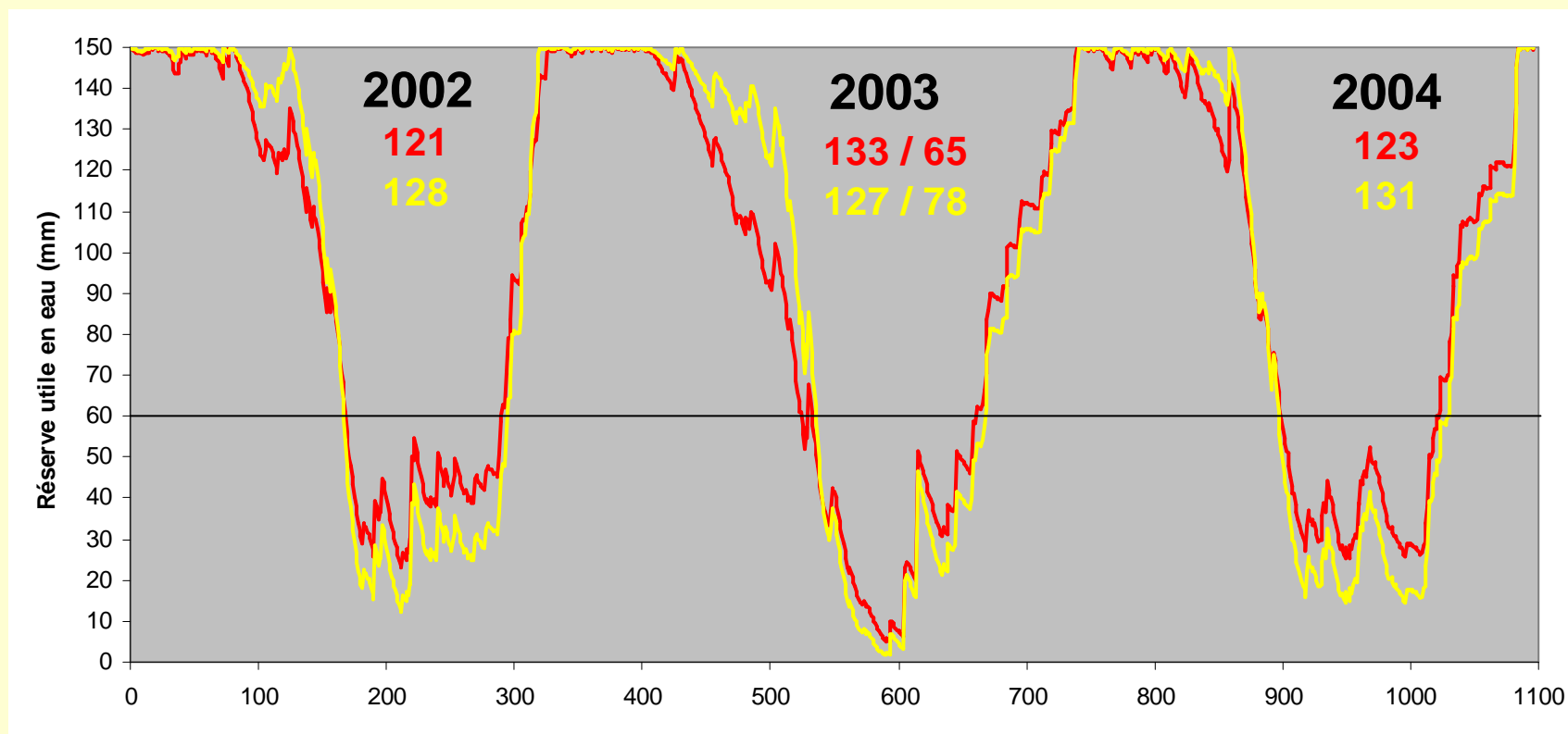
-11 jours

Bilan = - 13 jours

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

LAI et sécheresse de 2003

RUM = 150 mm



- 7 jours

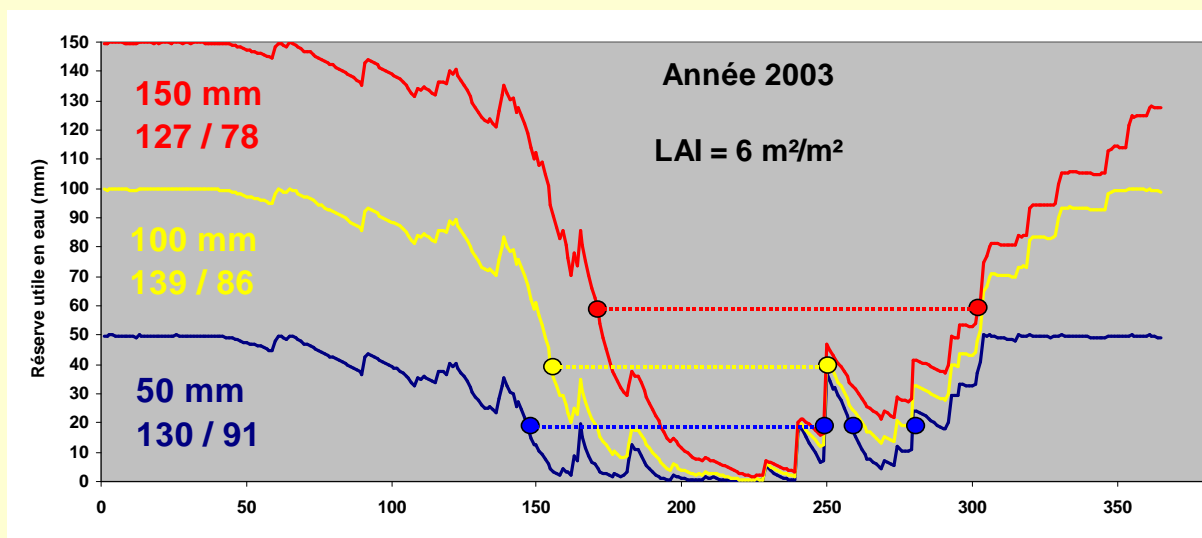
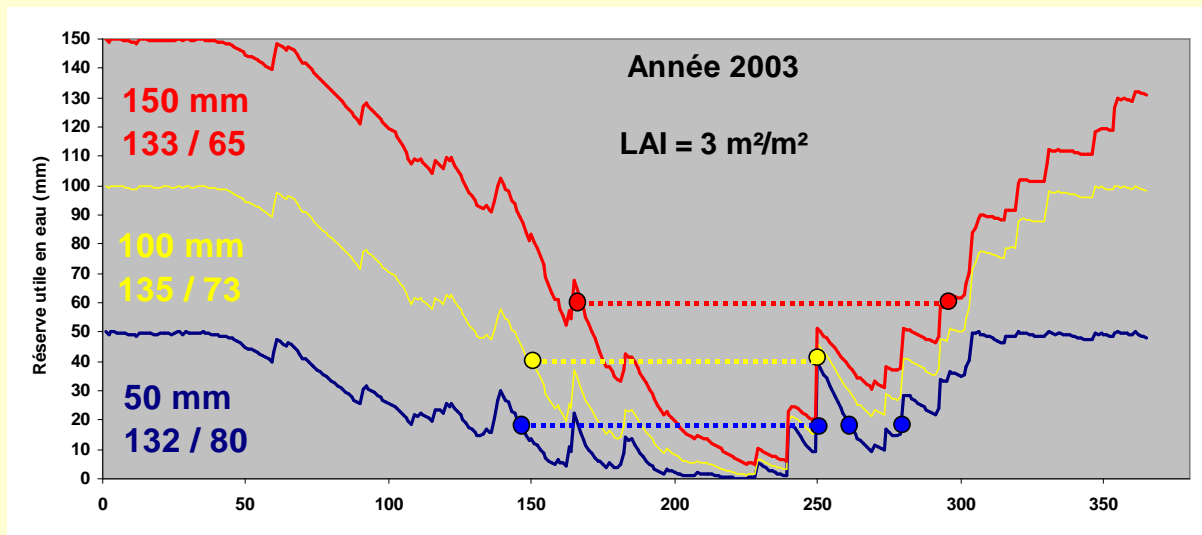
+ 6 jours

- 8 jours

Bilan = - 9 jours

III. Le bilan hydrique... un indicateur du stress hydrique des plantes

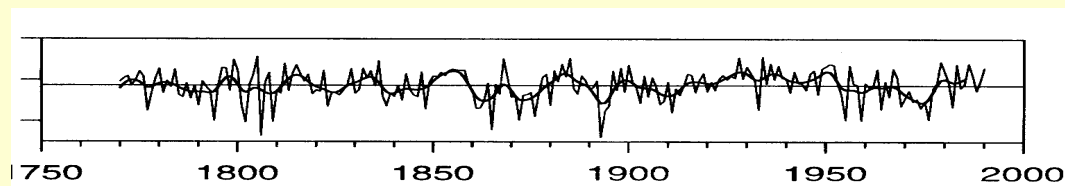
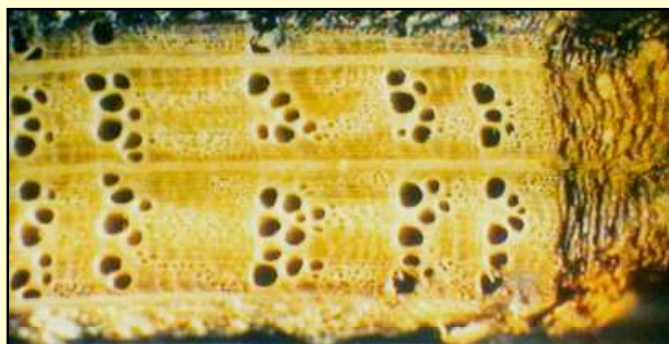
LAI / RUM et sécheresse de 2003



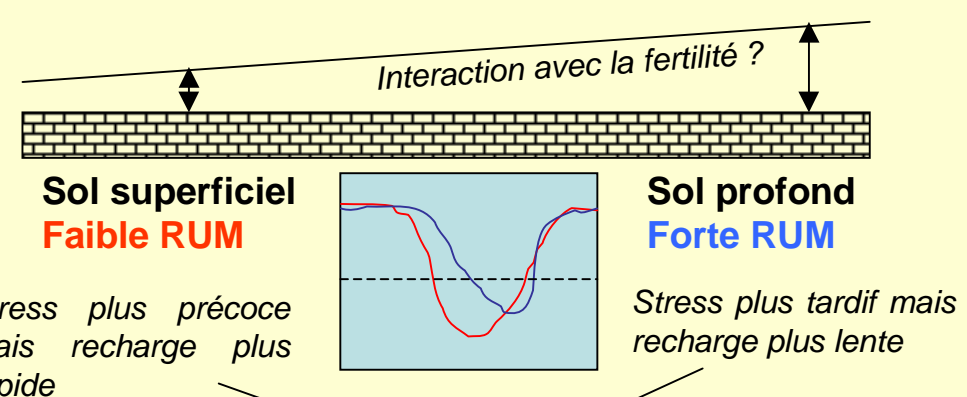
Seconde partie

Que sait-on de la sensibilité des essences forestières au climat ?

Les acquis des études dendroclimatiques
menées notamment dans le cadre du réseau RENECOFOR



Principes généraux de la réponse des essences au climat



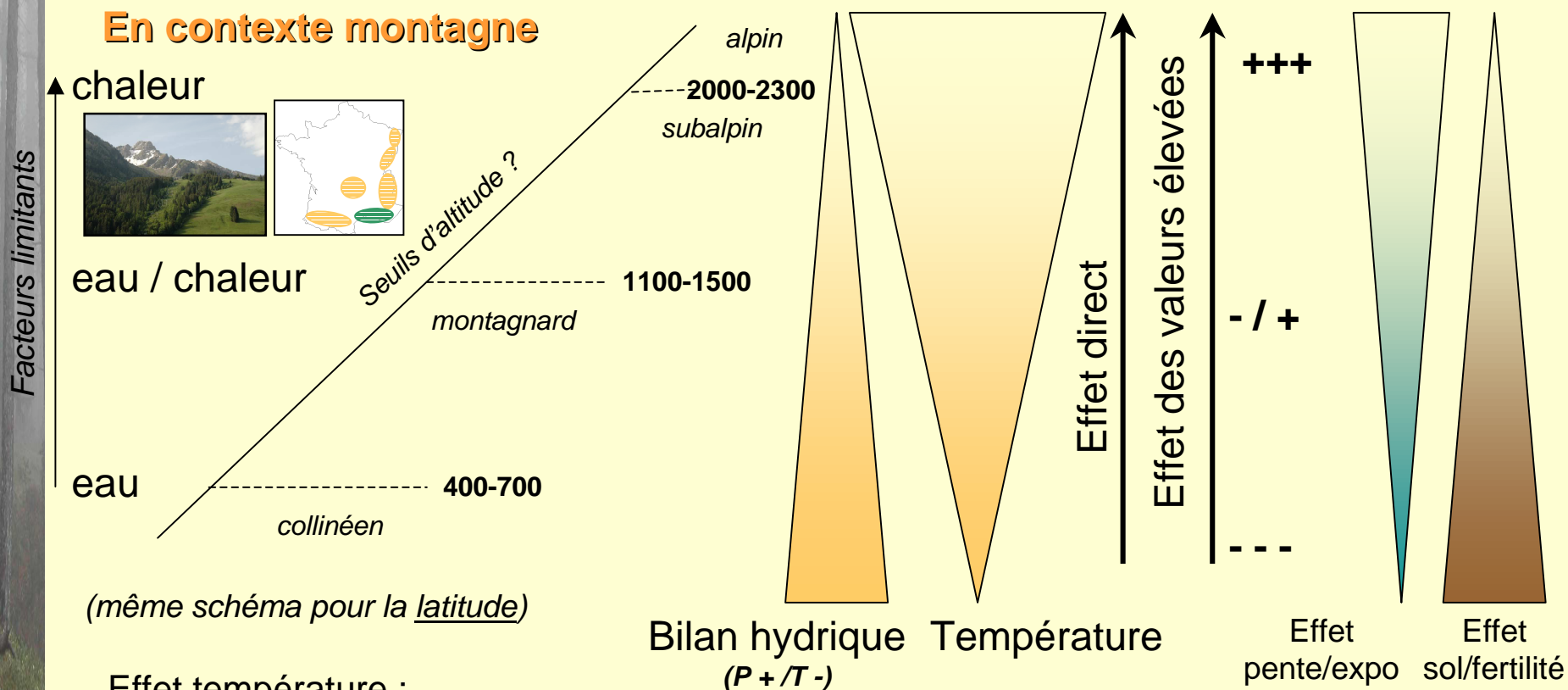
Seuil de « sensibilité » à la RUM / espèce
 Enracinement différentiel des essences
 Sols hydromorphes ?
 Topographie et topoclimat... apports latéraux d'eau

Problème des arrière-effets

Principes généraux de la réponse des essences au climat

L'altitude et le topoclimat règlent l'importance du rapport BH / T

En contexte montagne



(même schéma pour la latitude)

Effet température :

- direct sur la photosynthèse
- indirect sur la longueur de la saison de végétation (fonte neige, réchauffement du sol...)
- activité racinaire, mycorrhizienne...

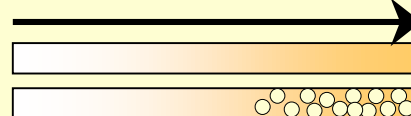
Une même approche... la dendroclimatologie



Les compartiments anatomiques



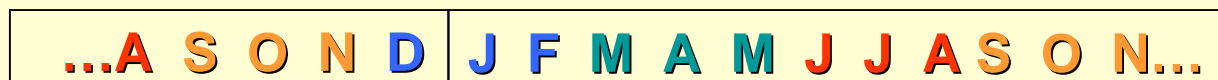
Bois initial → Bois final



hiver... printemps... été... automne

Année n-1

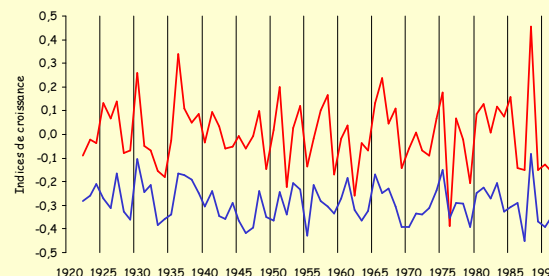
Année n



Arrière-effets

hiver printemps été automne

- thermique... Tmin, Tmax, Tmoy, ETP
- pluviométrique... pluie
- bilan hydrique... (P-ETP), (P-ETP)/RUM...
- Approche corrélative (fonctions de réponse)



Acquis des études menées dans le Renecofor

Les sites... 63 peuplements et plus de 1800 arbres

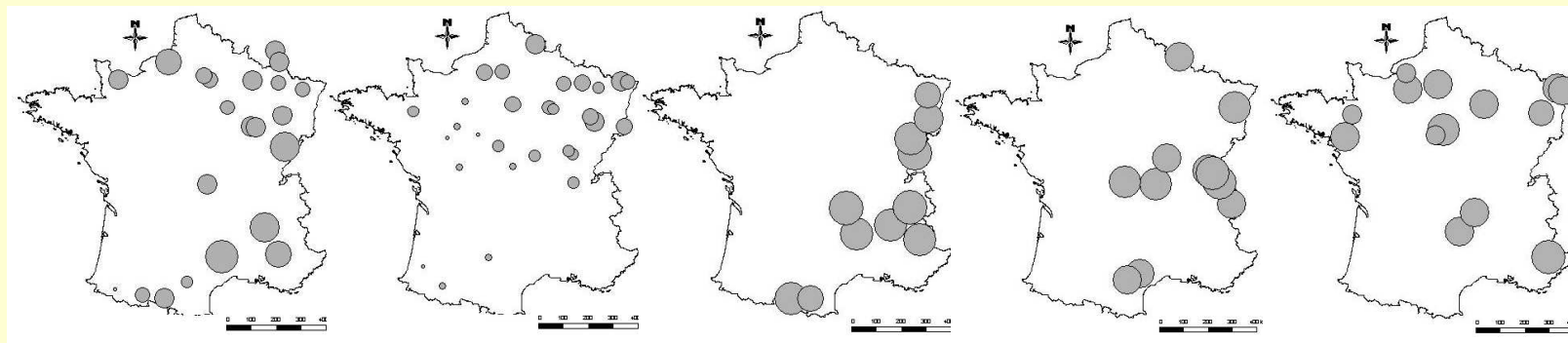
Hêtre

Chênes S. et P.

Sapin

Epicéa

Pin sylvestre



15 hêtraies
450 arbres
50-1300 m (470)
77 à 274 mm (133)

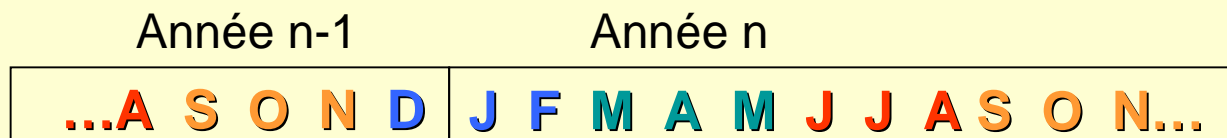
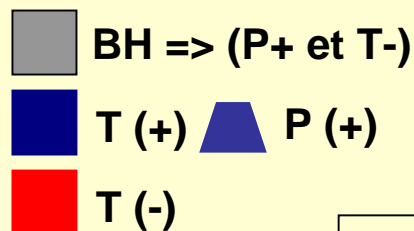
11 sapinières
328 arbres
400-1360 m (967)
50 à 190 mm (106)

14 pineraies
420 arbres
38-1670 m (386)
50 à 170 mm (97)

15 chênaies
433 arbres
57-370 m (222)
59 à 270 mm (182)

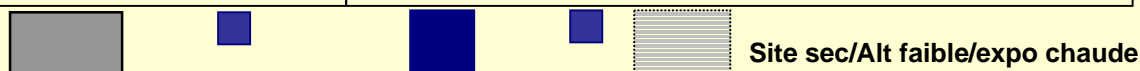
8 pessières
240 arbres
600-1700 m (1014)
65 à 149 mm (108)

Acquis des études dendroclimatologiques en France



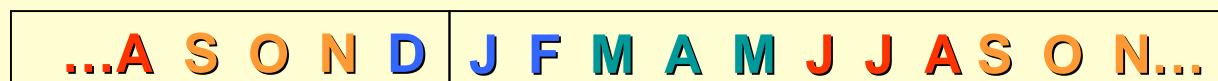
Sapin pectiné

Vosges, Jura, Alpes, Pyrénées



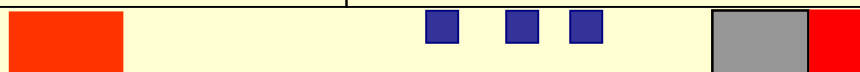
Cerne large =>

- pas de sécheresse en fin d'été n-1
- températures hivernales clémentes (février) (très forte sensibilité aux froids intenses)
- printemps humides sur les sites les plus secs et/ou altitudes plus faibles
- arrière-effets importants « effet mémoire des stress passés »



Epicéa

Jura, Alpes



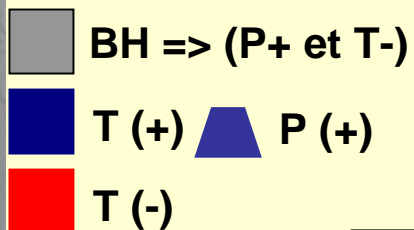
Cerne large =>

- températures douces en fin d'été n-1
- pas de sécheresse en début d'été et températures estivales modérées (août)
- moindre sensibilité aux froids intenses que le sapin

P et T		mai	juin	juillet	août
1400	N	▲	▲	▲	▼
	S	▲	▲▼	▲▼	▼
1950	N		▼▲	▼▲	▼
	S	▲	▲	▲	

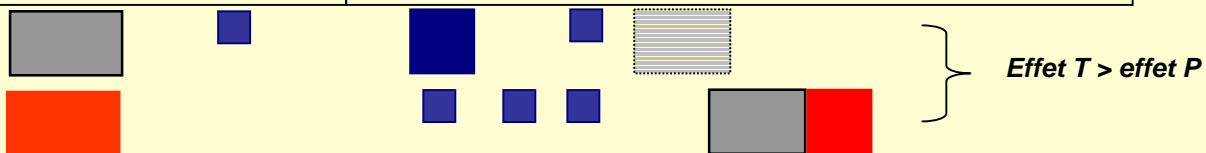
Alpes internes
(Desplanque et al. 1998)

Acquis des études dendroclimatologiques en France



...A S O N D | J F M A M J J A S O N...

Sapin pectiné

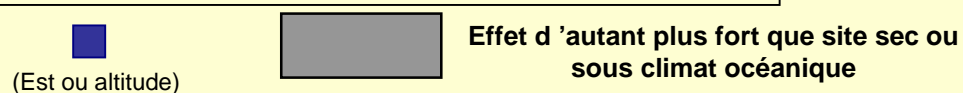


Epicéa

Pin sylvestre

...A S O N D | J F M A M J J A S O N...

Renecofor



Alpes

suisses et autrichiennes
(700-1000 m)

Pyrénées espagnoles
(950-1890 m)

Zone méditerranéenne

zone forestière alt. Élevée
milieux ouverts secs



Cerne large =>

- la mise en place du cerne dépend essentiellement des précipitations
- printemps et été humides
- effet d' autant plus fort que le site est sec
- effet important sous climat océanique
- très peu sensible aux froids hivernaux et gelées

Acquis des études dendroclimatologiques en France

■ BH => (P+ et T-)

■ T (+) ▲ P (+)

■ T (-)

Année n-1

Année n

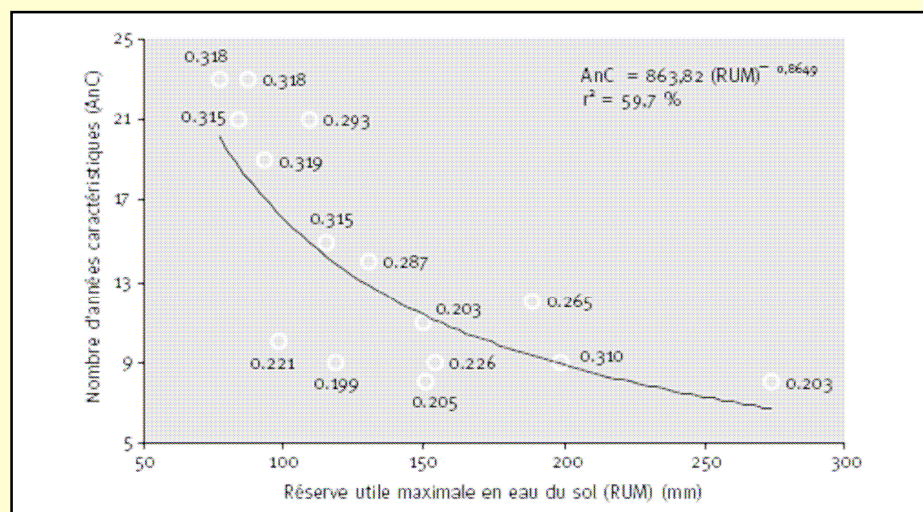
...A S O N D | J F M A M J J A S O N...

Hêtre



Cerne large =>

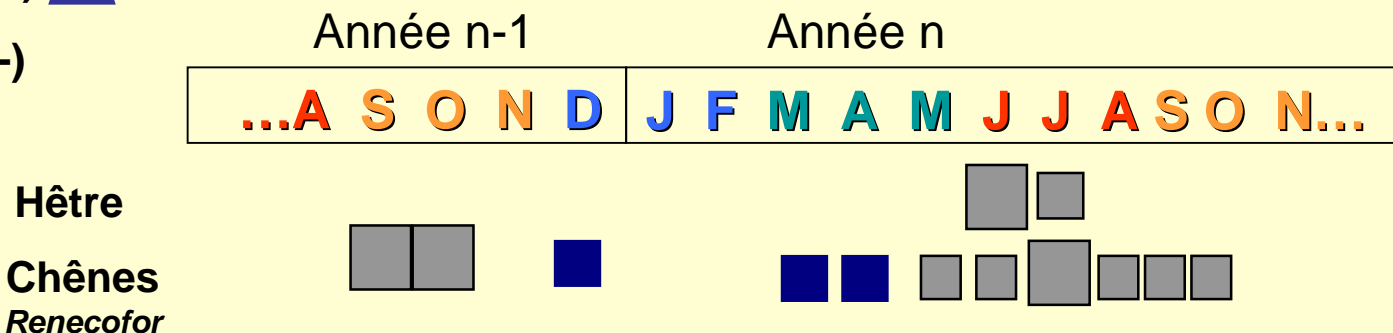
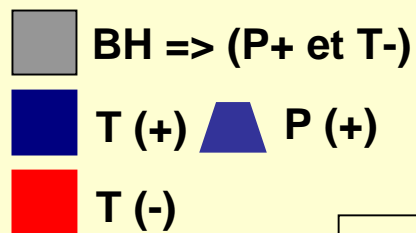
- rôle essentiel des pluies du début d'été en Europe (mai à juillet)
- faible sensibilité directe aux températures
- en France, le BH de juin est le facteur essentiel commun
- fortes réductions en cas de fortes sécheresses mais récupération rapide (avant 2003 ?)



Seuil de sensibilité = 100 mm

(Lebourgeois, RFF, 2005)

Acquis des études dendroclimatologiques en France



Renecofor
 Nord de la France (Mériani, 2008)

Cerne large =>

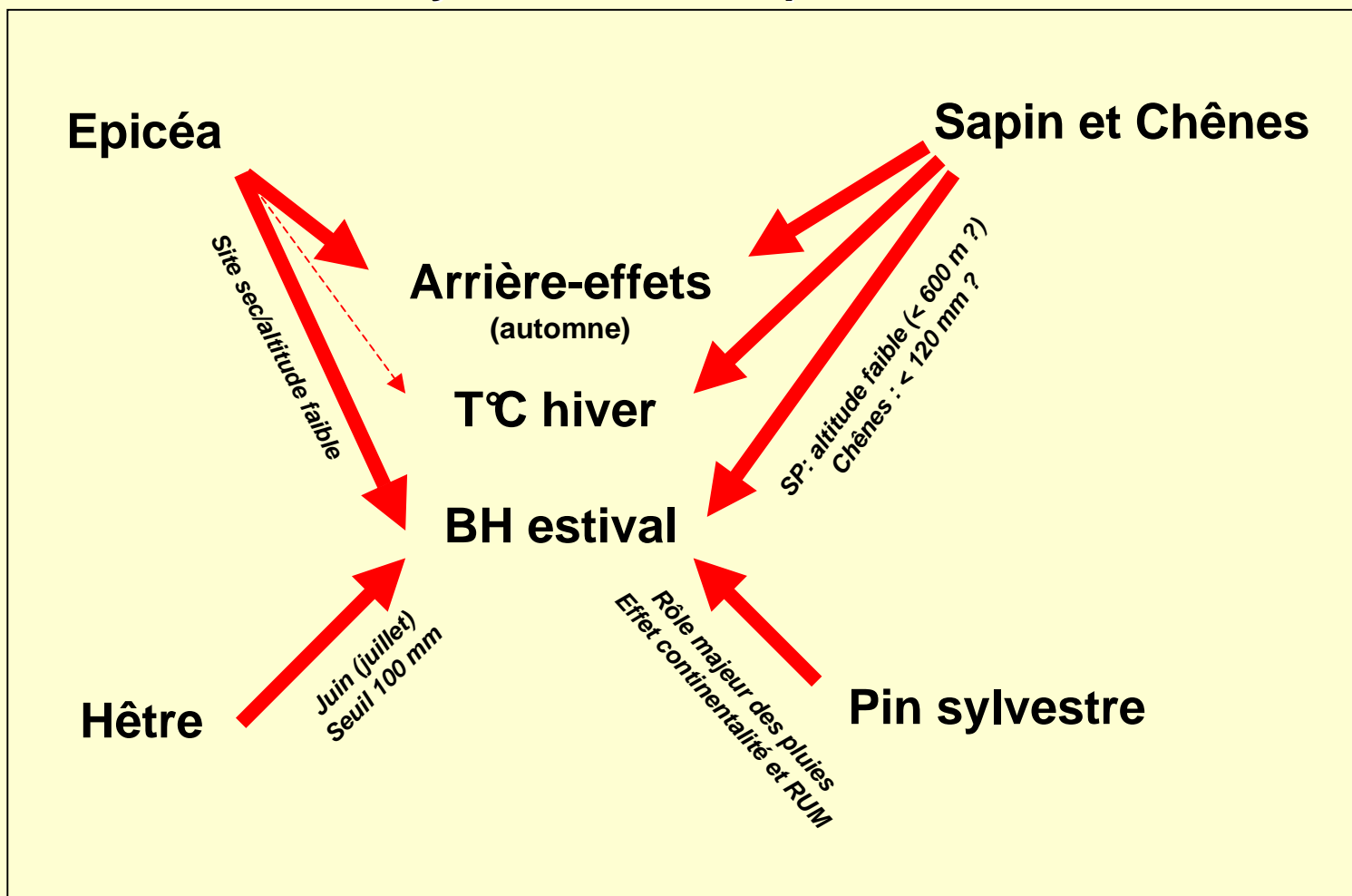
- forte hétérogénéité des réponses au climat
- aucun facteur explicatif fort et commun aux chênaies
- rôle du BH d'été mais également de fin de saison
- Différences CHS/CHP nettes seulement pour les extrêmes
- Interaction complexe région x fertilité x RUM (Mériani, 2008)

Ouest de la France :

Sensibilité BH estival augmente....
 quand RUM diminue (< 120 mm)
 quand acidité augmente (pH < 4.6)

Acquis des études dendroclimatologiques en France

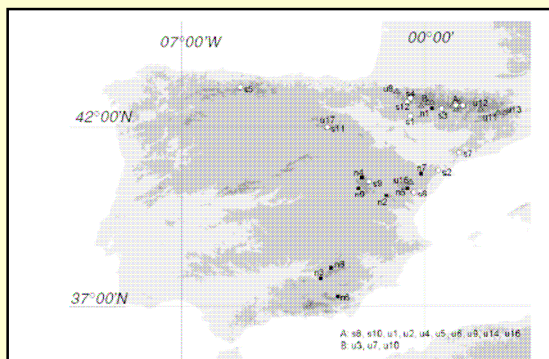
Essai de synthèse des comportements



Changements de comportement dans le futur ?

Acquis des études dendroclimatologiques en France

Evolution de la sensibilité des essences au cours du Xxième siècle

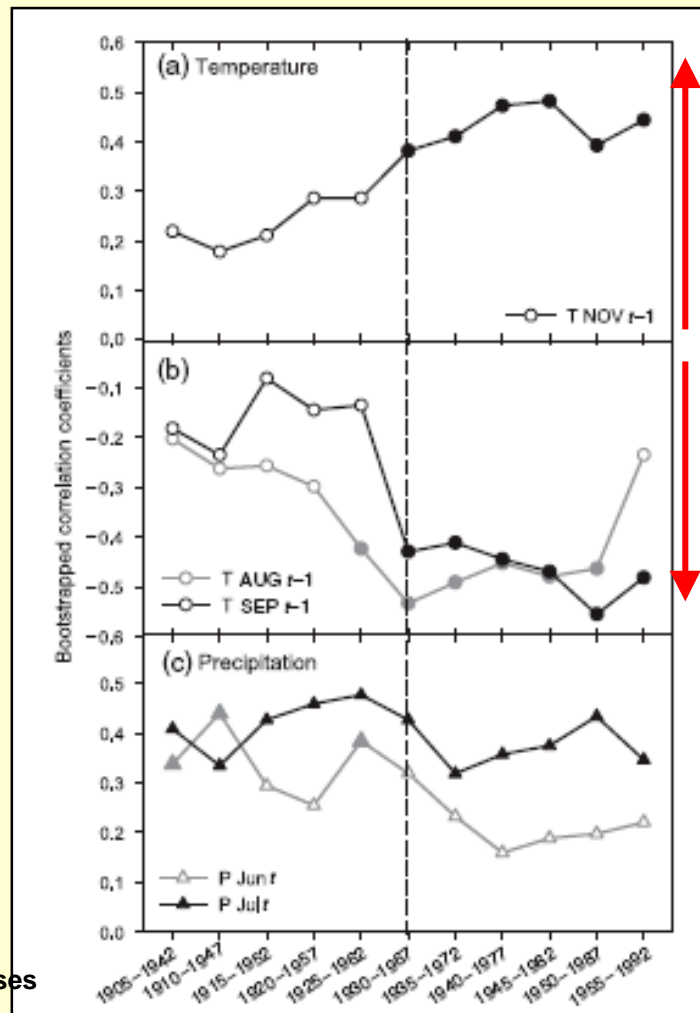


Pin à crochets
 Pin noir
 Pin sylvestre

Pyrénées espagnoles
 950 à 1890 m

(Andreu et al. 2007, GCB, 13, 804-815)

Augmentation du « synchronisme » des réponses



La croissance de l'année n dépend de plus en plus de la sécheresse de fin d'été de l'année précédente

=> en relation avec le réchauffement observé pour ces mois