



HAL
open science

La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers.

Nathalie Bréda, André Granier, Gilbert Aussenac

► To cite this version:

Nathalie Bréda, André Granier, Gilbert Aussenac. La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers.. *Revue forestière française*, 2004, 56 (2), pp.109-131. 10.4267/2042/5081 . hal-03449335

HAL Id: hal-03449335

<https://hal.science/hal-03449335>

Submitted on 25 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA SÉCHERESSE DE 2003 DANS LE CONTEXTE CLIMATIQUE DES 54 DERNIÈRES ANNÉES : ANALYSE ÉCOPHYSIOLOGIQUE ET INFLUENCE SUR LES ARBRES FORESTIERS

NATHALIE BRÉDA - ANDRÉ GRANIER - GILBERT AUSSENAC

L'été 2003 restera sans doute dans les mémoires comme l'été de la **grande canicule** et d'une **sécheresse exceptionnelle**. Les médias en ont fait largement écho dès l'apparition de symptômes visibles (changement de couleur des feuillages et chute prématurée de feuilles). Toutefois, la mémoire climatique est subjective dans l'esprit du grand public comme dans celui des forestiers. La comparaison avec la sécheresse de 1976 a été au centre des discussions et parfois commentée prématurément sans éléments quantitatifs adaptés. Il ne suffit pas en effet de comparer des pluviométries pour caractériser l'intensité, la durée et la précocité d'une sécheresse au niveau du sol (sécheresse édaphique). Une approche écophysiologique est indispensable pour caractériser et interpréter correctement les conséquences visibles (chute de feuilles) ou plus insidieuses telles l'effet sur la croissance, sur l'intégrité des racines — qui conditionnent l'absorption d'eau ou encore sur le xylème — qui assure la conduction de la sève. L'écophysiologie forestière étudie, *in situ* ou en conditions contrôlées, la diversité des mécanismes de réponse des arbres aux contraintes, et en particulier (mais pas uniquement) face aux événements climatiques extrêmes et exceptionnels tels que ceux de l'été 2003.

En s'appuyant sur des calculs de bilans hydriques issus de séries climatiques de Lorraine, les objectifs de cet article sont :

- de situer le climat et la sécheresse 2003 dans la chronologie des 54 dernières années,
- de comparer précisément l'intensité des déficits hydriques de quelques sols forestiers, leur durée et leur précocité entre 1976 et 2003,
- d'illustrer et discuter les différences de contrainte hydrique subie par les feuillus et les résineux d'une part, ou imposées par les différents types de sols d'autre part,
- et de discuter des conséquences de telles contraintes hydriques sur les arbres.

CARACTÉRISATION CLIMATIQUE DE L'ANNÉE 2003

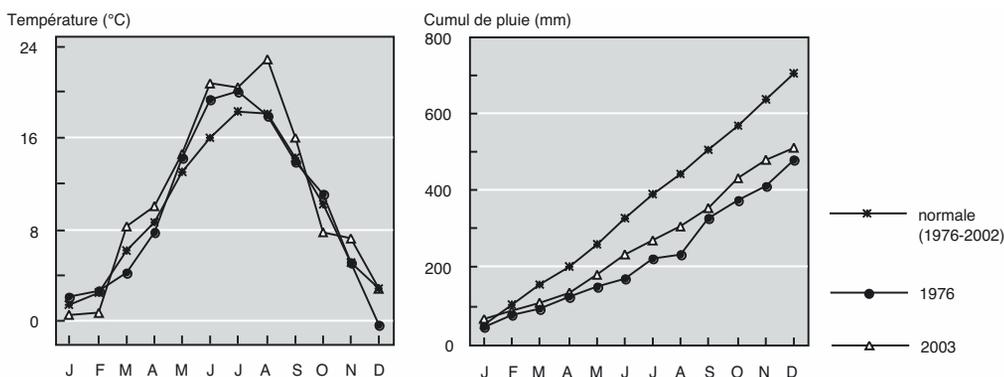
L'année 2003 se caractérise par des températures moyennes de l'air supérieures à la normale (période 1976-2002) pour tous les mois de mars à septembre (figure 1, p. 110). L'écart a atteint 4,9 °C par rapport à cette normale au mois d'août, ce qui reflète bien la canicule prolongée enregistrée pendant ce mois. En 1976, seuls les mois de mai à juillet avaient présenté des températures moyennes supérieures à la normale. L'été 2003 apparaît ainsi exceptionnellement chaud, avec une période de 12 jours avec des températures de l'air supérieures à 34 °C à Amance

(Meurthe-et-Moselle), alors qu'une seule journée de ce type avait été enregistrée en 1976. À l'échelle nationale, Météo-France a enregistré des températures supérieures à 35 °C dans les deux-tiers des stations météorologiques et supérieures à 40 °C dans 15 % des stations. Les températures maximales de l'été 2003 ont été significativement supérieures (2 °C) à celles des trois derniers étés les plus chauds (1976, 1983, 1994) (source : Météo France).

En ce qui concerne la pluviométrie, les deux années 2003 et 1976 sont très semblables jusqu'en avril, puis un écart apparaît avec une pluviométrie sensiblement plus faible en 1976 de mai à juillet. Les conditions climatiques de l'arrière-saison 2003 ont été également particulières, avec le retour d'une certaine humidité après la canicule et un mois de novembre particulièrement doux, ce qui a notamment permis aux résineux non desséchés d'avoir une activité assimilatrice importante au retour des pluies. Ceci pourrait compenser, au moins partiellement, les conditions difficiles de l'été et donc avoir une influence positive pour la reprise de croissance des arbres au printemps 2004.

Ainsi, avec une pluviométrie plus forte et des températures moyennes plus élevées, il n'est pas possible de prédire *a priori* le bilan hydrique et la sévérité de la sécheresse. Il faut pour cela s'appuyer sur les meilleures connaissances disponibles sur la sécheresse édaphique. Nous commencerons donc par un rappel sur la façon de quantifier cette dernière.

FIGURE 1 COMPARAISON DES TEMPÉRATURES MENSUELLES MOYENNES ET DU CUMUL DE PRÉCIPITATIONS DE 1976 ET DE 2003, MESURÉS AU POSTE MÉTÉOROLOGIQUE DE L'INRA, AMANCE (MEURTHE-ET-MOSELLE)



UNE SÉCHERESSE ÉDAPHIQUE DÉFINIE PAR UN CALCUL DE BILAN HYDRIQUE

Une **sécheresse édaphique** est une **diminution de la réserve en eau des sols suffisamment sévère pour que le fonctionnement des arbres ne soit plus optimal**. Pour caractériser une sécheresse sous un peuplement forestier, il faut avant tout définir l'épaisseur de sol susceptible d'être colonisée par les racines et la réserve utile de ce compartiment, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale que les arbres peuvent en extraire, exprimée en mm d'eau (1 mm d'eau = 1 l/m²). Cette réserve utile est comprise entre la teneur en eau à la capacité au champ et le maximum théorique d'extraction, souvent fixé au point de flétrissement permanent. Toutefois, il faut rappeler que les arbres sont capables d'extraire de l'eau du sol à des potentiels plus bas que les plantes herbacées à l'origine de cette définition (Bréda *et al.*, 1995 ; Bréda *et al.*, 2002).

La réserve utile d'un sol dépend de ses capacités de rétention d'eau, liées à ses propriétés physiques qui déterminent essentiellement sa macroporosité (texture, densité, structure, charge en éléments grossiers) et à certaines propriétés chimiques (teneur en carbone, capacité d'échange cationique). La capacité des arbres à mobiliser des réserves en eau profondes constitue leur premier atout pour résister à un déficit pluviométrique. C'est d'ailleurs pour cette raison que les prairies, à enracinement plus superficiel, s'étaient desséchées et avaient jauni beaucoup plus tôt dans l'été. L'architecture du système racinaire des arbres (traçant, pivotant ou plus complexe), ses aptitudes à franchir des obstacles (colonisation de fentes dans les roches-mères, infiltration dans les lignes de structure) et à supporter des contraintes (engorgement par exemple) expliquent en grande partie la forte variabilité de la taille du réservoir "sol" entre les différentes stations et sous différentes espèces ligneuses. Ces caractéristiques du système racinaire déterminent la profondeur de sol à prendre en compte pour estimer la réserve utile du sol et pèsent très fortement sur les capacités de survie en condition de sécheresse extrême, car seulement un faible pourcentage des racines fines accède alors à ces réserves profondes. L'appréciation du système racinaire *in situ* est difficile, mais peut être occasionnellement réalisée si l'on s'en donne les moyens, soit par observation directe sur fosses très profondes, soit indirectement par mesure des prélèvements d'eau jusqu'à de grandes profondeurs (souvent supérieures à 2 m).

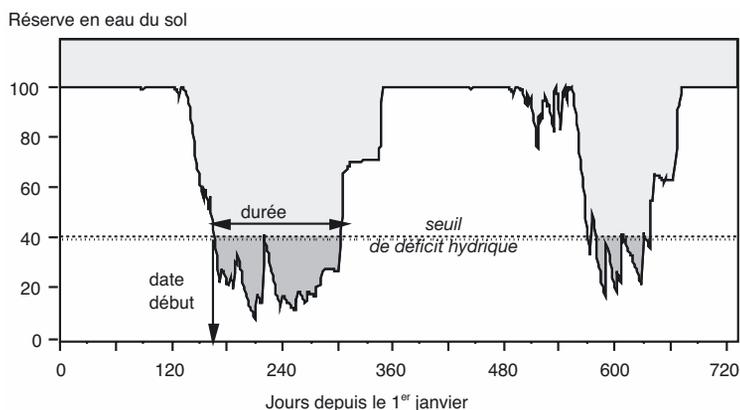
La réserve en eau d'un sol est un paramètre très dynamique, qui évolue en premier lieu en fonction de la pluviométrie (flux d'eau entrant principal, auquel s'ajoutent les apports latéraux) et en second lieu par la consommation en eau (ou évapotranspiration) des couverts (principal flux d'eau sortant auquel s'ajoutent les pertes par écoulement latéral ou le drainage vertical). Les principes du calcul de bilan hydrique journalier et les fonctions permettant de calculer les principaux flux pourront être retrouvés dans Granier *et al.* (1995). Nous rappellerons ici rapidement le déterminisme et les éléments de la régulation de la consommation en eau des peuplements. Les arbres absorbent de l'eau qu'ils puisent dans le sol pour assurer leur alimentation minérale et leur transpiration. Lorsque le sol est bien alimenté en eau, cette consommation est maximale, et déterminée en premier lieu par l'évapotranspiration potentielle, qui n'est autre que la combinaison des facteurs climatiques (rayonnement, température, humidité de l'air, vitesse du vent). Le second facteur contrôlant la consommation maximale en eau d'un peuplement forestier est son indice foliaire, c'est-à-dire la surface de feuilles de tous les arbres, rapportée à la surface du sol (Bréda, 1999a).

Les écophysiologistes définissent un seuil de déficit hydrique du sol en dessous duquel les arbres ferment significativement leurs stomates, ralentissant alors la consommation de l'eau restant dans le sol, mais limitant aussi l'entrée de carbone par photosynthèse. Pour beaucoup d'espèces feuillues et résineuses, et dans différents types de sols, la consommation en eau est maximale jusqu'à la valeur seuil de 40 % de la réserve maximale en eau dans le sol (Granier *et al.*, 1999). Dès lors que ce seuil est franchi, les arbres régulent leur consommation (fermeture des stomates) d'autant plus fortement que la disponibilité en eau dans le sol diminue (Granier *et al.*, 1995). Nous avons développé différents indicateurs qui peuvent être utilisés pour quantifier le déficit hydrique : la date à laquelle la réserve en eau du sol passe en dessous de 40 % (date de début de déficit), la durée pendant laquelle la réserve est en dessous de 40 %, et l'intensité du déficit définie comme la valeur cumulée des écarts au seuil de 40 % pour la période allant du débourrement à la chute des feuilles pour les feuillus et pour toute l'année s'agissant des résineux. Ces indicateurs sont illustrés dans la figure 2 (p. 112).

Nous avons par ailleurs montré que ce seuil de 40 % de la réserve utile, défini à partir de mesures d'échanges gazeux ou de flux de sève, correspondait également à un arrêt ou un fort ralentissement de la croissance radiale, voire induisait une rétraction des tissus élastiques du tronc (voir figure 1, p. 110 ; Granier *et al.*, 1995).

FIGURE 2 **EXEMPLE D'ÉVOLUTION DE LA RÉSERVE EN EAU D'UN SOL AU COURS DE DEUX ANNÉES CONSÉCUTIVES**

Un déficit hydrique induisant une fermeture des stomates apparaît lorsque la réserve du sol chute en dessous de 40 % de la réserve utile. Les flèches illustrent trois caractéristiques du déficit hydrique : la date de début du déficit, sa durée et l'indice de déficit hydrique (zone grisée foncée). On constate sur cet exemple que le sol est à la capacité au champ au début des deux saisons de végétation (débourrement au jour 120).



COMPARAISON DES SÉCHERESSES ÉDAPHIQUES DE 1976 ET DE 2003 DANS L'EST DE LA FRANCE

Pour comparer les sécheresses édaphiques subies par les forêts lorraines en 1976 et en 2003, nous avons calculé l'évolution journalière de la réserve en eau pour deux sols présentant des réserves utiles (RU) contrastées (RU moyenne : 130 mm et RU forte : 175 mm). Nous avons utilisé les données climatiques enregistrées par la station automatique située à Hesse (site-atelier de l'INRA appartenant au réseau européen Carboeuroflux, Moselle) et par la station Météo-France de Sarrebourg. Les mesures de vitesse du vent, rayonnement global, température et humidité de l'air ont été utilisées pour calculer l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman et la pluviométrie a été utilisée pour calculer la quantité d'eau entrant dans le sol, après interception par les couverts. Le calcul a été effectué pour un peuplement feuillu d'indice foliaire (LAI) faible⁽¹⁾ égal à 5 (type chênaie ou hêtraie éclaircie) ou fort égal à 7,5 (chêne avec important sous-étage ou hêtraie dense) et pour un peuplement résineux d'indice foliaire égal à 7,5 (type Épicéa ou Douglas denses). Ces caractéristiques du couvert reprennent des valeurs moyennes classiquement mesurées dans des chênaies et des hêtraies d'une part, dans des plantations de Douglas ou d'Épicéas d'autre part (Bréda *et al.*, 2002 ; Bréda, 2003). Les figures suivantes illustrent l'évolution de la réserve relative en eau du sol au cours de la saison dans les diverses configurations décrites.

Dans le cas des résineux en Lorraine (figure 3, p. 113), les précipitations de l'hiver 1975-1976 étaient juste suffisantes pour reconstituer la réserve utile fin janvier, avant la reprise de la transpiration. En conséquence, même si l'approvisionnement des réserves profondes (nappes) a été très faible au cours de cet hiver, l'état hydrique des sols en début de saison était normal. Par

(1) L'indice foliaire d'un couvert forestier est sa surface foliaire par unité de surface au sol : il s'exprime sans dimension et correspond à des m² de feuilles par m² de sol ; la notation abrégée de ce paramètre est LAI, issue du terme anglo-saxon Leaf Area Index (pour plus d'informations, le lecteur pourra se reporter à Bréda, 1999a).

contraste, l'hiver 2002-2003 a été largement excédentaire en précipitations et la recharge des nappes a été bonne, la plupart des sols étant déjà à la capacité au champ au premier janvier, ce qui est la situation normale en Lorraine. Toujours sous peuplement résineux, le déficit hydrique s'est installé plus précocement en 2003 qu'au printemps 1976 (tableau I, ci-dessous), surtout sur les sols à réserve utile moyenne (figure 3, ci-dessous, 28 mars 2003 contre 14 avril en 1976) et s'est terminé un mois plus tôt en 1976 qu'en 2003. Notons que, sur ce type de sol à réserve utile moyenne, le retour à la capacité au champ n'était pas encore atteint fin décembre 2003.

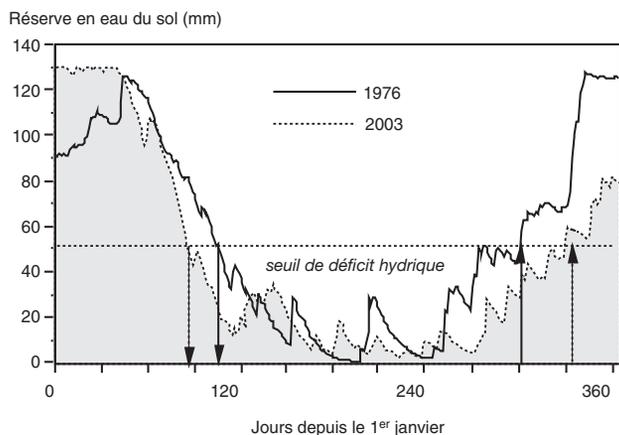


FIGURE 3
ÉVOLUTION
DE LA RÉSERVE EN EAU D'UN SOL
DE 130 MM DE RÉSERVE UTILE
SOUS COUVERT RÉSINEUX
D'INDICE FOLIAIRE ÉGAL À 7,5

La ligne pointillée représente le niveau de réserve en dessous duquel les flux d'eau et de carbone dans les arbres sont régulés. Les flèches indiquent la date de début et de fin de déficit hydrique.

En comparant feuillus et résineux, toujours pour un sol à réserve utile moyenne (130 mm), on constate que les déficits hydriques ont :

- débuté en 2003 environ deux mois plus tôt dans les peuplements résineux (entre fin mars et mi-avril selon la réserve utile du sol) que sous feuillus ;
- été plus précoces pour les résineux en 2003 qu'en 1976 (17 jours plus tôt en 2003, tableau I, ci-dessous).

TABLEAU I **Comparaison entre 1976 et 2003 des dates de début de déficit hydrique**
selon la réserve utile du sol et la phénologie de l'espèce
(feuillus avec débournement au jour 120 ou résineux, indice foliaire)

Indice foliaire	Feuillus				Résineux	
	LAI = 5		LAI = 7,5		LAI = 7,5	
Année	1976	2003	1976	2003	1976	2003
RU = 130 mm						
Début	169 (18 juin)	172 (21 juin)	167 (16 juin)	167 (16 juin)	104 (14 avril)	87 (28 mars)
Durée	106 jours	129 jours	114 jours	132 jours	197 jours	244 jours
RU = 175 mm						
Début	177 (26 juin)	180 (29 juin)	174 (23 juin)	177 (26 juin)	106 (16 avril)	102 (12 avril)
Durée	116 jours	112 jours	127 jours	121 jours	201 jours	246 jours

De façon plus générale, les déficits hydriques ont :

- duré plus longtemps en 2003 qu'en 1976, sous résineux quel que soit le type de sol et sous feuillus sur sol à réserve utile moyenne ;
- été d'une durée comparable pour les deux années pour les feuillus sur sol profond.

Ces caractéristiques de précocité et de durée de la période de déficit hydrique sont en outre déterminées par la répartition de pluies au cours de la saison mais aussi par la nature de ces précipitations (événements pluvieux longs de faible intensité, orages...).

Dans les peuplements feuillus, le déficit hydrique dans le sol s'est installé pratiquement à la même date en 1976 et en 2003 (entre la mi-juin et la fin juin) et s'est achevé fin octobre (figure 4, ci-dessous) ; le retour à la capacité au champ a tout juste été atteint fin décembre

2003, soit un peu plus tardivement qu'en 1976.

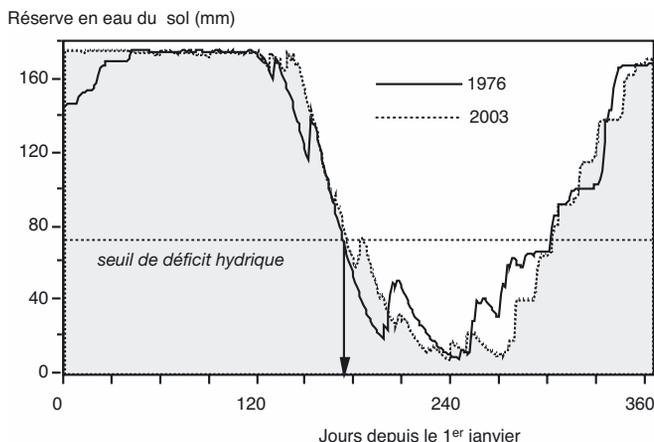


FIGURE 4
ÉVOLUTION DE LA RÉSERVE EN EAU D'UN SOL DE 175 MM DE RÉSERVE UTILE SOUS COUVERT FEUILLU D'INDICE FOLIAIRE ÉGAL À 7,5

La ligne pointillée représente le niveau de réserve en dessous duquel les flux d'eau et de carbone dans les arbres sont réduits. La flèche indique la date de début de déficit hydrique.

La précocité d'apparition du déficit hydrique est un critère simple de comparaison entre années. Toutefois, nous avons défini un autre indicateur de contrainte hydrique, appelé indice de déficit hydrique⁽²⁾, calculé selon la formule (Granier *et al.*, 1999) :

$$IDH = \sum (0,4 * RU - R) / RU$$

avec RU la réserve utile du sol (mm) et R la réserve en eau présente le jour j (mm) ; l'indice de déficit hydrique est donc une grandeur sans dimension. Ce calcul est cumulé pour tous les jours où R est inférieure à 0,4 * RU, sur une période de temps pouvant être l'année, le mois, ou la saison de végétation (entre débournement et chute des feuilles).

Cet indice correspond à la surface en grisé foncé sur la figure 2 (p. 112). Ce cumul d'écarts est estimé pendant toute la ou les périodes pendant laquelle la réserve en eau du sol est en dessous du seuil de 40 % de la réserve utile. Cet indice de déficit hydrique est donc plus **intégrateur**, puisqu'il prend en compte à la fois la **durée et l'intensité de la période de déficit**. Sur la base de cet indice, on constate que le déficit hydrique a été plus sévère en 2003 qu'en 1976 dans tous les types de sols et sous tous les types de couverts (tableau II, p. 115).

Ce tableau illustre tout d'abord que le déficit hydrique est plus fort sous les peuplements à fort indice foliaire, sans pour autant qu'il y ait proportionnalité entre la variation de LAI (ici + 50 %) et celle du déficit hydrique (de + 10 % à + 20 %). Ceci tient au fait que les relations entre la transpiration, ou l'interception des pluies et le LAI ne sont pas linéaires. C'est une des raisons pour laquelle il est nécessaire de recourir à la modélisation intégrant ces effets et leurs rétroactions pour décrire ce qui se passe dans différentes situations. Un fort LAI augmente donc l'intensité des déficits hydriques à la fois en diminuant la pluie arrivant au sol et en augmentant la capacité de transpiration des arbres. Cette conclusion est fondamentale pour le forestier dans la mesure où il peut intervenir sur son contrôle.

(2) Pour plus de détails sur le calcul de cet indice et le principe de calcul du bilan hydrique journalier, le lecteur pourra se reporter à Granier *et al.* (1995).

TABLEAU II

**Comparaison des indices de déficit hydrique de 1976 et 2003
selon la réserve utile du sol et la phénologie de l'espèce
(feuillus vs. résineux, indice foliaire)**

Indice foliaire	Feuillus				Résineux	
	LAI = 5		LAI = 7,5		LAI = 7,5	
Année	1976	2003	1976	2003	1976	2003
RU = 130 mm	61,2	78,6	67,7	86,9	114,9	155,5
RU = 175 mm	50,3	65,3	60,4	74,8	115,3	145,1

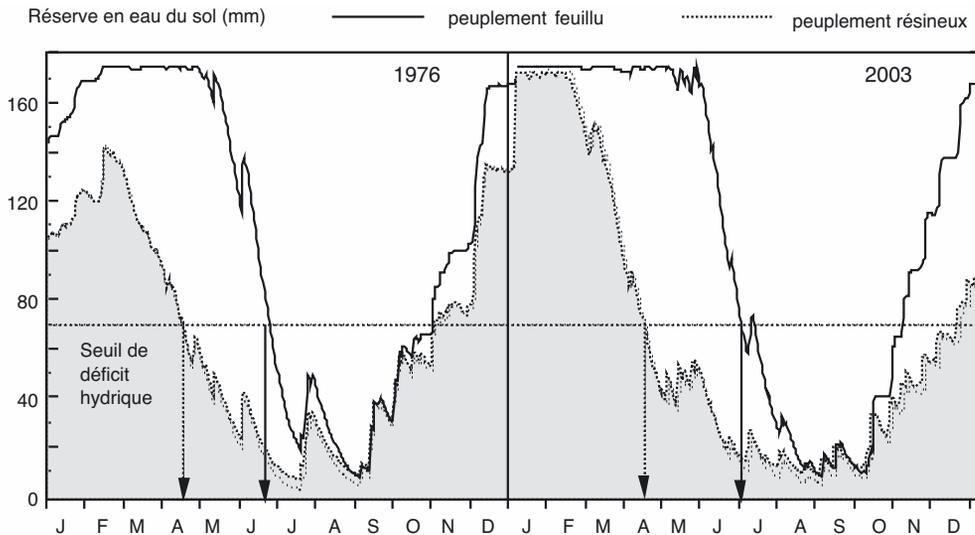
Les différents indices de déficit hydrique (date, durée, déficit cumulé) illustrent bien le fait que le dessèchement du sol est différent sous feuillus et sous résineux. Ces différences se retrouvent pour toutes les années, et notamment 1976 et 2003. Plusieurs éléments expliquent ces différences de cinétique :

- la phénologie, qui détermine en particulier la précocité de transpiration des espèces à feuilles persistantes : dès que l'évapotranspiration potentielle (ETP) augmente, la transpiration et la photosynthèse sont possibles. En revanche, le débourrement des espèces décidues intervient plus tard et la consommation en eau des arbres est retardée, même si l'évapotranspiration du sous-étage est active.

- l'interception des précipitations, plus forte chez les conifères en raison à la fois d'un indice foliaire plus élevé et d'un taux plus élevé de saturation⁽³⁾ des aiguilles (Aussenac, 1970 ;

**FIGURE 5 ÉVOLUTION DE LA RÉSERVE EN EAU D'UN SOL DE 175 MM DE RÉSERVE UTILE
SOUS PEUPEMENT FEUILLU OU RÉSINEUX D'INDICE FOLIAIRE ÉGAL À 7,5**

La ligne pointillée horizontale représente le niveau de réserve en dessous duquel le fonctionnement écophysiologique des arbres est régulé.



(3) La capacité de saturation du feuillage représente la quantité de pluie nécessaire à mouiller totalement l'ensemble des éléments foliaires. Cette capacité se traduit par le fait qu'un promeneur est à l'abri sous les arbres pendant le début de l'averse.

Aussenac et Boulangeat, 1980). Une transpiration plus précoce et une interception plus forte en peuplement résineux se traduisent par une diminution plus précoce de la réserve en eau du sol et par un remplissage plus faible du compartiment sol que sous feuillu à pluviométrie incidente égale.

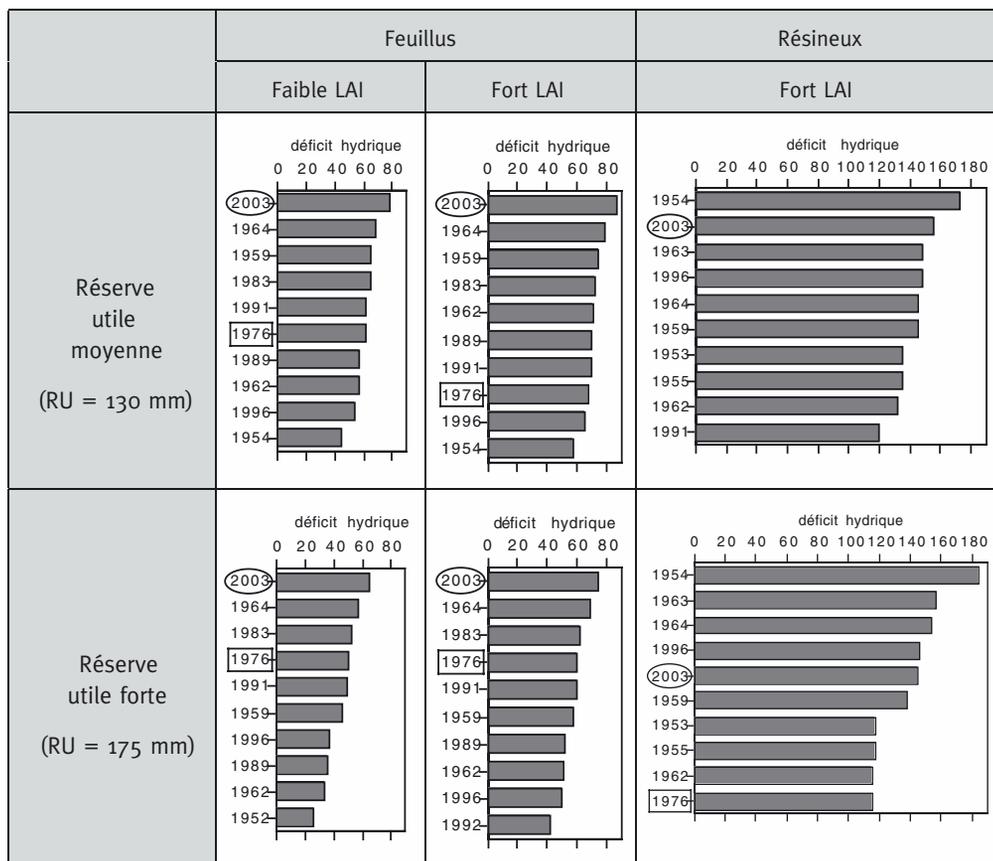
Au final, le déficit hydrique apparaît plus précocement et dure plus longtemps sous résineux, comme l'illustre la figure 5 (p. 115).

LES DIX SÉCHERESSES LES PLUS FORTES EN LORRAINE ET LEURS CONSÉQUENCES

Il nous semble important de replacer ces deux années de "sécheresse exceptionnelle" dans le contexte des 54 dernières années, et de les comparer à des sécheresses qui ont marqué cette période sans toujours marquer, comme nous le verrons, la mémoire des forestiers. Pour ce faire,

FIGURE 6 CLASSEMENT PAR ORDRE DÉCROISSANT DES 10 ANNÉES DE PLUS FORTE CONTRAÎNTE HYDRIQUE EN LORRAINE AU COURS DE LA PÉRIODE 1950-2003

La contrainte hydrique est caractérisée par le déficit hydrique calculé par calcul rétrospectif de bilan hydrique dans différentes configurations de peuplement (feuillus à faible ou fort indice foliaire, résineux à fort indice foliaire) et de sol (réserve utile moyenne ou forte). Les années 1976 et 2003 sont mises en valeur par un encadré.



nous avons calculé le bilan hydrique du site de Hesse⁽⁴⁾ pour chaque année depuis 1950. Parmi les diverses combinaisons de réserve utile et type de couvert, nous avons retenu les dix années ayant présenté la plus forte contrainte hydrique ; elles sont classées par ordre décroissant dans la figure 6 (p. 116).

Pour les peuplements feuillus, l'année 2003 apparaît comme la plus sèche des 54 dernières années dans toutes les configurations, juste devant l'année 1964, alors que 1976 ne se classe qu'entre le 4^e ou 8^e rang selon les hypothèses (figure 6, p. 116). Les années 1983 et 1991 figurent aussi parmi les plus sèches.

Pour les peuplements résineux, la contrainte hydrique 2003 se classe au 2^e rang pour les sols à réserve utile moyenne, tandis que celle de 1976 n'est pas parmi les 10 années les plus contraignantes. Sur sol profond, l'année 2003 ne se classe qu'au 5^e rang, tandis que 1976 se classe au 10^e rang. Le déficit hydrique de l'année 1954 reste le plus élevé des 54 dernières années. Les années 1963, 1964 ou plus récemment 1996 ont également provoqué des contraintes parmi les plus sévères pour les résineux. Ce classement permet en outre de relativiser l'intensité de la sécheresse de 1976, qui est de loin moins grave pour les résineux que les années citées ici.

On retiendra donc de ces classements que la sécheresse édaphique de 2003 est la plus sévère enregistrée en Lorraine au cours des 54 dernières années pour les feuillus alors que, pour les peuplements résineux, elle a été très marquée (2^e position) pour les sols à réserve utile moyenne, et un peu moins (5^e position) en sol profond, l'année 1954 restant la plus forte contrainte des 54 dernières années.

QUELLES SONT LES CONSÉQUENCES ÉCOPHYSIOLOGIQUES D'UNE SÉCHERESSE ÉDAPHIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT DE L'ARBRE ?

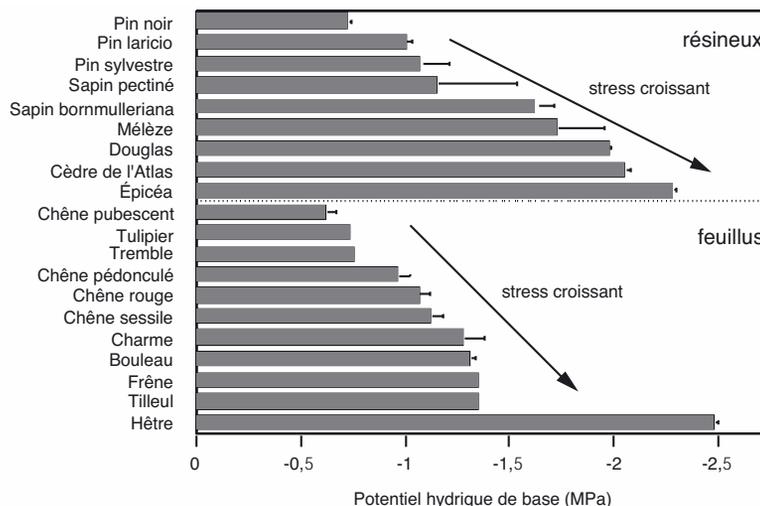
Nous avons jusqu'ici défini le déficit hydrique par rapport à un seuil de disponibilité en eau dans le sol induisant une régulation des échanges gazeux (transpiration et photosynthèse) au niveau des stomates ; cette régulation est fréquente, puisqu'elle intervient presque tous les étés (et pas seulement lors de sécheresses exceptionnelles), et parfaitement réversible. Lors de précipitations, les stomates s'ouvrent à nouveau et les échanges gazeux reprennent même si la réserve en eau du sol n'est que partiellement reconstituée. L'épuisement progressif de la réserve en eau du sol entraîne une diminution progressive du potentiel hydrique Ψ_{sol} , c'est-à-dire que la quantité d'énergie à fournir pour extraire l'eau du sol est de plus en plus importante. Dans l'arbre aussi, on peut définir un potentiel hydrique noté en lettre grecque psi (Ψ , voir encadré p. 123). Lorsque le potentiel hydrique dans le sol diminue, on observe une diminution du potentiel hydrique de base des feuilles (Ψ_b), mesuré en fin de nuit, lorsque les flux hydriques dans l'arbre sont nuls. Cette valeur peut être considérée comme un indicateur du niveau de contrainte hydrique perçue par l'arbre. Dans le but de comparer la sécheresse "perçue" par différentes espèces d'arbres, dans un milieu donné et sous le même climat, nous avons mesuré le 27 août 2003, au maximum de dessèchement, le potentiel hydrique de base d'individus adultes d'une large gamme d'espèces, feuillues et résineuses, de l'Arboretum d'Amance⁽⁵⁾. En moyenne, les potentiels hydriques de base des résineux étaient plus négatifs que ceux des feuillus (figure 7, p. 118), ce qui est parfaitement cohérent avec ce que nous avons vu précédemment : la teneur en eau du sol était

(4) Les données de 1996 à 2003 ont été mesurées directement sur le site de Hesse ; les données antérieures (1950 à 1995) ont été reconstituées à partir de corrélations entre Hesse et les postes Météo-France de Sarrebourg pour les précipitations et de Danneles-Quatre-Vents pour le rayonnement, la température, le vent et l'humidité de l'air.

(5) L'Arboretum d'Amance est situé à 13 km à l'est de Nancy, à une altitude de 250 m. Le sol est de type brun lessivé sur marnes liasiques. Les premières plantations y ont été réalisées en 1900 et il comporte à ce jour 323 espèces, autochtones ou introduites.

FIGURE 7 CLASSEMENT DE DIFFÉRENTES ESPÈCES D'ARBRES ADULTES FEUILLUS ET RÉSINEUX EN FONCTION DE LA VALEUR DE POTENTIEL HYDRIQUE FOLIAIRE DE BASE MESURÉE LE 27 AOÛT 2003 (ARBORETUM D'AMANCE)

Les mesures sont des moyennes de deux arbres et deux rameaux par arbre pour les résineux, de deux feuilles issues de branches différentes pour les feuillus.



plus faible sous couvert résineux que feuillu. Dans cette représentation, les Pins apparaissent comme les espèces résineuses souffrant le moins de la sécheresse, en raison sans doute de leur fermeture précoce des stomates, ce qui leur permet d'éviter un trop fort dessèchement. Chez les feuillus, les arbres les moins "stressés" regroupent des espèces très résistantes à la sécheresse (Chêne pubescent) et capables d'extraire de l'eau profonde du sol et des espèces ayant déjà perdu beaucoup de feuilles, les quelques feuilles encore sur l'arbre présentaient des potentiels peu négatifs (Tulipier de Virginie, Tremble). Les espèces soumises aux plus fortes contraintes hydriques fin août 2003 étaient le Hêtre et l'Épicéa.

Cette diminution du potentiel hydrique de base s'accompagne d'une diminution régulière de Ψ_{\min} (voir encadré). L'évolution conjointe de Ψ_b et Ψ_{\min} diffère fortement entre espèces. Dans certains cas, un parallélisme est maintenu pendant une période de dessèchement assez longue ; dans d'autres, Ψ_b et Ψ_{\min} se rejoignent rapidement (Aussenac et Granier, 1978). On peut interpréter ces différences en termes de régulation des pertes en eau ; un parallélisme entre les deux valeurs traduit le maintien de pertes en eau (par transpiration) importantes, alors qu'une convergence signale une réduction précoce de la transpiration. Cette représentation met bien en évidence les différentes stratégies de résistance à la sécheresse des essences forestières, avec d'un côté une régulation précoce dès que le potentiel hydrique des feuilles diminue et de l'autre, une intensité de fermeture partielle permettant de maintenir un flux d'eau et de CO_2 non nul.

Cependant, si, comme au cours des étés 1976 et 2003, la sécheresse se prolonge, des mécanismes, irréversibles cette fois, vont intervenir en dépit de la régulation mise en place par l'arbre. Ainsi, lorsque le potentiel hydrique devient très négatif alors que le sol ne peut plus fournir d'eau, la tension de la sève dans les vaisseaux devient extrêmement forte, et des bulles d'air apparaissent dans le système conducteur des pétioles des feuilles, voire des petits rameaux et des branches : c'est l'embolie qui, au-delà d'un certain seuil, constitue un dysfonctionnement

irréversible car l'intégrité du système conducteur ne peut être restaurée au cours de la saison, même si les conditions hydriques s'améliorent. Les feuilles ne sont alors plus alimentées par la sève, elles flétrissent (photo 1, p. 122). Une partie des feuilles tombent encore vertes ; ce phénomène a été très fréquent en août 2003, où les feuilles, petits rameaux feuillés ou aiguilles qui jonchaient le sol restaient parfois bien verts, comme cela avait déjà été noté en 1982 sur le Hêtre (Schütt *et al.*, 1984) (voir photo 2, p. 122)⁽⁶⁾.

Il est important de souligner que les flux de sève brute, flux en phase liquide, sont étroitement couplés au flux de vapeur d'eau qui s'échappe dans l'atmosphère au niveau des stomates. Le rôle des stomates dans ce couplage n'est bien compris et démontré que depuis les années 1990 (Jones et Shutherland, 1991 ; Cochard *et al.*, 1996 ; Sperry, 2000) ; c'est là un des progrès majeurs de la compréhension écophysologique de la réponse à la sécheresse des arbres. Avant la démonstration de ce couplage, Aussenac et Granier (1978) avaient proposé de classer la réaction à la sécheresse des essences selon leur **potentiel de base critique**. Ce potentiel était défini comme le potentiel de base atteint lorsque l'écart entre les potentiels de base et minimum devenait inférieur à un écart fixé arbitrairement à 0,4 MPa. Aujourd'hui, on considère que la fermeture des stomates joue un rôle de protection du système conducteur de la sève : en limitant les tensions de l'eau entre le sol et les feuilles, les stomates maintiennent le système conducteur dans les limites de son fonctionnement. En l'absence de régulation stomatique, les tensions appliquées sur les colonnes d'eau dans le xylème seraient telles qu'un taux d'embolie catastrophique apparaîtrait, rendant alors impossible la circulation de l'eau du sol jusqu'aux feuilles.

On est à présent capable de relier le potentiel hydrique minimum atteint au plus fort du dessèchement (lorsque le potentiel de base devient critique) au seuil de vulnérabilité du système conducteur (figure 8, ci-dessous). Tyree et Sperry (1988) ont démontré qu'au-delà de ce seuil de vulnérabilité, les éléments conducteurs étaient exposés à un risque d'emballement catastrophique

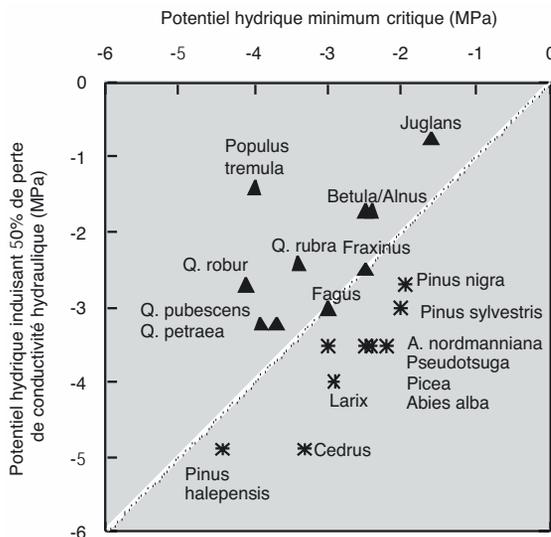


FIGURE 8

RELATION ENTRE LE POTENTIEL HYDRIQUE INDUISANT 50 % DE PERTE DE CONDUCTIVITÉ HYDRIQUE PAR EMBOLIE DU SYSTÈME CONDUCTEUR ET LE POTENTIEL HYDRIQUE MINIMUM MESURÉ LORS DES FORTES SÉCHERESSES DE 1976 ET 2003, AINSI QUE LORS D'EXPÉRIMENTATIONS DE DESSÈCHEMENTS *IN SITU*

Pour certaines études, le potentiel minimum a été calculé à partir du potentiel de base critique moins 0,4 MPa, selon la définition d'Aussenac et Granier (1978).

Synthèse originale d'après les travaux d'Aussenac et Granier, 1978 ; Aussenac et Valette, 1982 ; Bréda *et al.*, 1993 ; Cochard *et al.*, 1991 ; Cochard, 1992 ; Cochard *et al.*, 1997 ; Cochard *et al.*, 1999 ; Lu *et al.*, 1996 ; Tyree *et al.*, 1993 ; Froux *et al.*, 2002 ; Améglio *et al.*, 1999 ; Badalotti *et al.*, 2000.

(6) Notons toutefois que, contrairement à ce qui a pu être dit ou écrit, ce phénomène d'embolie des vaisseaux ne peut être responsable de la chute de grosses branches. Notre interprétation de ces chutes de branches serait plutôt mécanique. Les grosses branches, à leur insertion sur le tronc, présentent des bois de tension et de réaction qui ont pu présenter des déformations différentes lorsque le bois s'est déshydraté. Ces propriétés mécaniques différentielles associées à la forte déshydratation du bois pourraient avoir provoqué un bris puis la chute de branches.

de l'embolie, ce qui conduisait très rapidement à une perte totale de conduction de la sève. La figure 8 montre clairement que les résineux parviennent à maintenir leur potentiel hydrique foliaire largement en deçà de ce seuil, grâce à une régulation stomatique précoce. Chez les feuillus, on peut distinguer des espèces fonctionnant juste à la limite de ce risque hydraulique (Frêne, Hêtre), tandis que d'autres (Chênes, Noyer, Aulne, Bouleau) fonctionnent au-delà de cette limite de potentiel. Parmi ce dernier groupe, les Chênes tolèrent une certaine proportion d'embolie, tandis qu'Aulne et Bouleau perdent précocement leurs feuilles. Cette stratégie peut être aussi comprise comme une défense, la chute des feuilles limitant ensuite la diminution du potentiel hydrique dans le reste de l'arbre (photo 3, p. 122). Notons que des chutes prématurées de feuilles vertes se sont produites en août 2003 chez le Hêtre et le Frêne, tandis que des chutes anormalement fortes de rameaux annuels (dont le système conducteur était aussi embolisé) ont été observées sous les Chênes ; ce phénomène est connu sous le nom de décurtation. Rappelons aussi qu'un système conducteur embolisé ne peut être "réparé" au cours de la saison, et que la restauration de la conductance hydraulique ne sera assurée que la saison suivante par la mise en place d'un nouveau cerne. Ce processus est donc efficace chez les feuillus, mais on conçoit bien que les conifères, dont le renouvellement foliaire n'est que partiel, ne peuvent franchir sans risque ce seuil de dysfonctionnement.

Par ailleurs, Aussenac et Granier (1978) avaient mesuré à Amance des potentiels hydriques de base sur rameaux de 1 an au maximum de la sécheresse de 1976 sur une large gamme de jeunes résineux (13 à 15 ans). Nous avons reproduit ce type de mesure à la fin août 2003 sur les mêmes espèces adultes sur le même sol, alors

que le dessèchement du sol était maximal. La figure 9 (ci-contre) compare les potentiels hydriques de base atteints au cours de ces deux sécheresses exceptionnelles. On constate que, pour 5 des 7 espèces mesurées, le potentiel de base a été plus faible en 2003 qu'en 1976. Cette observation valide nos conclusions sur le niveau de contrainte hydrique de 2003 par calcul de bilan hydrique.

Potentiel de base été 2003 (MPa)

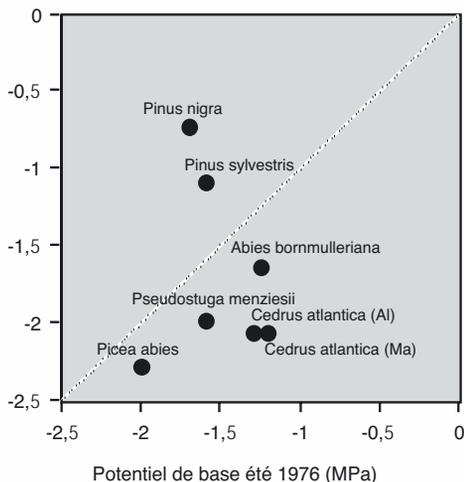


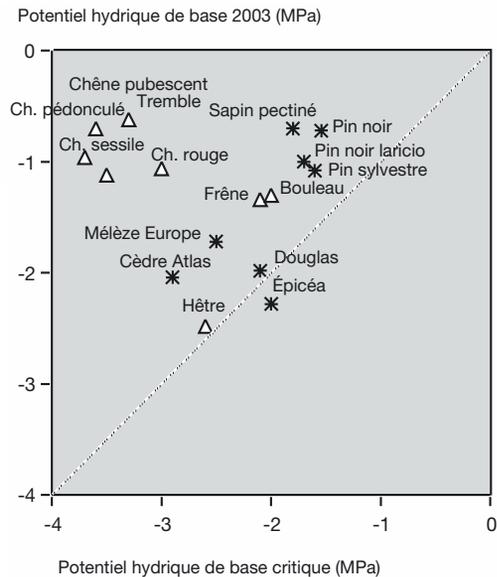
FIGURE 9

COMPARAISON DES POTENTIELS HYDRIQUES DE BASE ATTEINTS PAR QUELQUES ESSENCES FORESTIÈRES AU MAXIMUM DE LA SÉCHERESSE DE 1976 (D'APRÈS AUSSENAC ET GRANIER, 1978) ET DE 2003 EN FORÊT D'AMANCE (MEURTHE-ET-MOSELLE)

Nous pouvons en outre comparer les potentiels hydriques de base atteints au plus fort de la sécheresse 2003 avec les potentiels de base critiques disponibles dans la littérature. La figure 10 illustre cette comparaison, qui met une nouvelle fois en évidence que les résineux (notamment Épicéa et Douglas) ont approché cette valeur de potentiel critique, alors que la plupart des feuillus (excepté le Hêtre), dans les conditions pédo-climatiques de l'Arboretum d'Amance, sont restés en deçà. Ces essences (Hêtre, Épicéa et Douglas) ont atteint les plus fortes contraintes hydriques et ont d'ailleurs présenté les plus forts dommages visibles à la fin de l'été sur l'ensemble du territoire français. Ceci a fait l'objet d'une étude réalisée par le Département de la

Santé des Forêts (Département de la Santé des Forêts, 2004) ; il faut toutefois relativiser les différences entre espèces mises en évidence sur ces cartes, qui ne traduisent pas seulement la réaction physiologique mais aussi les conditions de sol, en particulier de sa réserve utile.

FIGURE 10
DIAGRAMME DE COMPARAISON
DES POTENTIELS HYDRIQUES DE BASE
ATTEINTS PAR QUELQUES ESPÈCES FORESTIÈRES
AU MAXIMUM DE LA SÉCHERESSE DE 2003
EN FORÊT D'AMANCE (MEURTHE-ET-MOSELLE)
AVEC LES POTENTIELS DE BASE CRITIQUES
DE CES MÊMES ESPÈCES



UNE PARTICULARITÉ DE L'ANNÉE 2003 : L'INTERACTION ENTRE DÉFICIT HYDRIQUE ET TEMPÉRATURES ESTIVALES EXCEPTIONNELLES

La canicule de l'été 2003 en Lorraine a concerné une période de 16 jours entre le 1^{er} et le 16 août, avec des températures maximales sous abri supérieures à 32 °C, avec un maximum absolu à 37,5 °C. Notons que c'est déjà sur les températures maximales du mois d'août que nous avons constaté des dérives à long terme de + 0,9 à + 2,2 °C (Lebourgeois *et al.*, 2001). Ces températures exceptionnelles sont intervenues alors que les stomates des arbres étaient déjà fermés en réponse à la sécheresse. Or, la transpiration joue un rôle important dans le refroidissement des feuilles, dont la température de surface est maintenue voisine de la température de l'air lorsqu'il y a un flux de transpiration. Comme la transpiration était pendant cette phase fortement réduite voire, en raison du déficit hydrique, dans certains cas bloquée, le refroidissement du feuillage n'était plus assuré et les températures atteintes à la surface des feuilles et du bois ont été exceptionnelles et, pour certains organes et espèces, létales. En effet, les températures de surface des feuilles, généralement inférieures aux températures de l'air lorsque la transpiration fonctionne, ont pu s'élever de 6 °C, et atteindre alors des températures supérieures à 45 °C.

Suite à cet épisode caniculaire, des dégradations des pigments photosynthétiques et du fonctionnement physiologique des feuilles sont apparues, conduisant à des jaunissements, des rougissements ou des brunissements précoces. Ces symptômes très visibles ont alerté les professionnels et les médias, alors que les symptômes liés uniquement à la sécheresse (flétrissements, chutes de feuilles vertes), plus précoces, étaient plus discrets mais tout aussi dommageables pour la physiologie de l'arbre. C'est la conjonction de ces deux contraintes, sécheresse extrême et fortes températures, qui est exceptionnelle. La sécheresse de 1976 par exemple n'avait pas été accompagnée de températures aussi durablement élevées (1 jour > 34 °C contre 12 en 2003). Ces températures très élevées ont sans doute été à l'origine de brûlures d'une partie du feuillage chez les espèces les plus sensibles ou ayant moins d'eau disponible, mais il n'est pas sûr qu'elles aient significativement aggravé les dégâts au-delà de leur influence sur l'ETP. Il reste



Photo 1

Feuilles de Hêtre déshydratées sur l'arbre. Il s'agit ici d'un symptôme strictement hydrique, sur une branche d'ombre située sur la partie basse de l'arbre. Les limbes sont restés verts

Photo Nathalie BRÉDA



Photo 2

Exemple de chute précoce de feuilles observées en août 2003 dans une jeune hêtraie. La proportion de feuilles tombées vertes est importante

Photo Nathalie BRÉDA



Photo 3

Exemple illustrant des stratégies contrastées entre un Chêne (à gauche) encore bien vert et normalement feuillé et un Bouleau (à droite) ayant perdu la majorité de son feuillage. Les feuilles encore en place sont brunes

Photo Nathalie BRÉDA

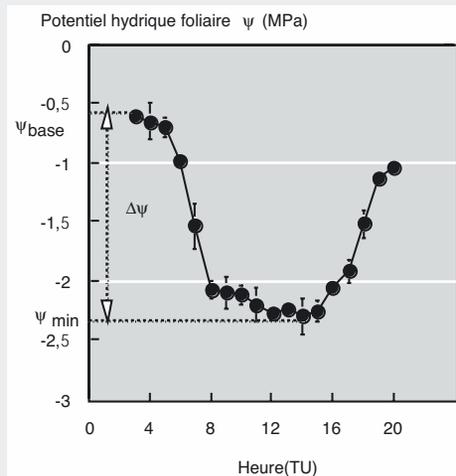
Le potentiel hydrique

Le potentiel hydrique est une grandeur physique, souvent notée par la lettre grecque psi (Ψ), qui peut être définie dans le sol, dans un organe végétal ou dans l'air. Dans une feuille ou un rameau d'arbre, le potentiel hydrique est classiquement mesuré à l'aide d'une chambre à pression de Scholander (photo ci-dessous). Il caractérise l'état de liaison de l'eau dans le végétal, et donc de contrainte hydrique subie à un instant donné. C'est en cela que cet indicateur est essentiel pour la compréhension de l'écophysiologie des essences forestières (Aussenac, 1985). En simplifiant un peu, la progression de la sécheresse se traduit par une réduction d'abord peu sensible, puis de plus en plus nette du potentiel hydrique du sol (Ψ_{sol}). En conséquence, le potentiel hydrique de l'arbre se réduit lui aussi progressivement. Cette réduction ne sera cependant pas strictement parallèle à celle du sol, car les fluctuations diurnes de l'évapotranspiration potentielle (rayonnement, déficit de saturation de l'air, température, vent) provoquent des fluctuations sinusoïdales du potentiel hydrique des feuilles (voir figure ci-dessous).



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

EXEMPLE DE CINÉTIQUE JOURNALIÈRE DE POTENTIEL HYDRIQUE CHEZ DU FRÊNE EN JUILLET



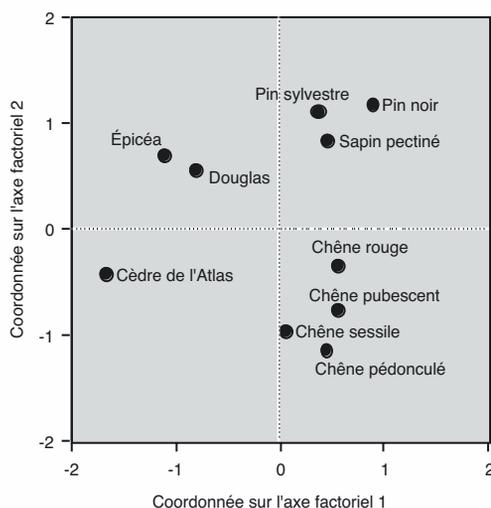
Ces cinétiques journalières présentent deux valeurs caractéristiques : en fin de nuit, en l'absence de transpiration et lorsque les réserves hydriques propres des arbres sont reconstituées, le potentiel hydrique de l'arbre est très proche du Ψ_{sol} ; cette valeur de fin de nuit est appelée *potentiel hydrique de base* (Ψ_b). Ce potentiel est équivalent au potentiel hydrique que l'on peut mesurer dans le sol, dans l'horizon colonisé par les racines encore le plus humide, et en général le plus profond. Dans la journée, le potentiel hydrique foliaire prend des valeurs inférieures, la valeur la plus faible étant généralement atteinte aux alentours de midi solaire. Cette valeur minimale correspond au *potentiel hydrique minimum* (Ψ_{min}), fonction de la demande climatique et de l'efficacité de la régulation des pertes en eau des arbres. D'une journée à l'autre, Ψ_{min} peut fortement varier selon les conditions microclimatiques ; une valeur réellement significative n'est atteinte que dans le cas d'une journée chaude et ensoleillée. C'est à ce moment que les contraintes dans l'arbre sont les plus sévères. Le rôle des stomates est alors de limiter, par réduction du flux de transpiration, la baisse de ce potentiel minimum à un niveau compatible avec le fonctionnement des éléments conducteurs de la sève.

cependant possible, mais ceci n'est pas visible depuis le sol sur les arbres adultes, que des bourgeons aient également été brûlés, compromettant la pousse de 2004. Nous avons observé de tels dégâts sur les pousses terminales dans des plantations récentes de Chêne et de Mélèze.

Les fortes températures peuvent aussi avoir un impact sur les paramètres de la photosynthèse même si les feuilles semblent encore vertes, mais cette question complexe est assez mal connue. Il est possible que l'installation progressive de la sécheresse, des rayonnements élevés et des fortes températures ait permis une acclimatation des paramètres biochimiques de la photosynthèse (Medlyn *et al.*, 2002). En effet, plusieurs études récentes ont montré que les paramètres de la photosynthèse s'adaptent largement à la température. Sur des semis d'une large gamme d'espèces (*Abies alba* Mill, *Acer pseudoplatanus* L., *Betula pendula* Roth, *Fagus sylvatica* L., *Fraxinus excelsior* L., *Juglans regia* L., *Quercus petraea* Matt Liebl., *Quercus robur* L.), des dommages irréversibles du photosystème ont été détectés pour des températures supérieures à 47 °C pour toutes ces espèces, bien que la forme de la réponse à la température des paramètres de la photosynthèse et ses optima diffèrent entre les espèces (Dreyer *et al.*, 2001 ; Robakowski *et al.*, 2002). On sait aussi que le seuil de température induisant des dommages irréversibles est variable suivant la saison (il augmente en été) et avec les conditions climatiques (il augmente avec la température ambiante et au cours d'une sécheresse, Ghouil *et al.*, 2003). Ces caractéristiques de résistance aux températures élevées font l'objet de travaux destinés à préciser les processus physiologiques sous-jacents et leur variabilité entre espèces.

ESSAI DE CLASSEMENT DES PRINCIPALES ESSENCES FORESTIÈRES SELON LEUR STRATÉGIE DE RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE

Les caractéristiques des essences forestières leur permettant de résister à la sécheresse sont nombreuses : un enracinement profond, un contrôle efficace ou précoce de l'ouverture stomatique, un système conducteur peu vulnérable à la cavitation, des tissus tolérant des potentiels hydriques faibles (par exemple grâce à un ajustement osmotique efficace), une capacité d'ajustement de la surface foliaire par chute précoce de feuilles ou aiguilles, etc. Un seul de ces critères ne suffit généralement pas à établir un classement entre les espèces, et nos observations réalisées au cours de l'été 2003 peuvent contribuer à proposer un classement relatif des essences.



Une analyse en composantes principales des valeurs de potentiel de base critique, potentiel de base 2003 et potentiel induisant 50 % de perte de conductivité, permet de distinguer quatre groupes d'essences (figure 11, ci-contre). L'axe factoriel 1 oppose des espèces atteignant des potentiels très négatifs lors de sécheresse (Cèdre, Épicéa, Douglas) à d'autres espèces (les Chênes, Pins et Sapin) dont les potentiels sont peu négatifs. L'axe 2 discrimine dans chacun

FIGURE 11
POSITION DE QUELQUES ESSENCES
DANS LE PLAN FACTORIEL DISCRIMINANT
LES COMPORTEMENTS ÉCOPHYSIOLOGIQUES
VIS-À-VIS DE LA SÉCHERESSE ÉDAPHIQUE

des groupes précédents les espèces selon la précocité de leur régulation stomatique lorsque la sécheresse progresse.

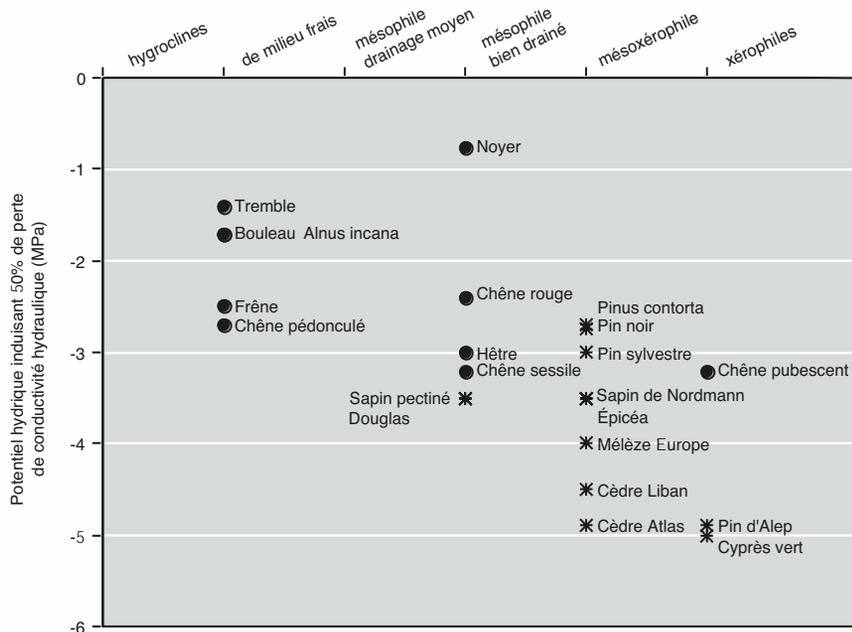
Chez certains feuillus, la chute précoce des feuilles constitue une stratégie d'évitement, pour échapper à un déficit hydrique important, comme l'illustrent les potentiels peu négatifs mesurés chez le Bouleau, le Tulipier ou le Tremble, ayant perdu la majeure partie de leur surface transpirante au moment de notre mesure ; cette stratégie a cependant une contrepartie négative car elle empêche la reprise de l'assimilation photosynthétique au moment du retour des pluies en septembre : ceci diminue d'autant le remplissage des réserves glucidiques des arbres, indispensables pour l'endurcissement et la résistance au froid, l'entretien des tissus en hiver et lors de la reprise de croissance au printemps suivant. Les espèces ayant conservé leur feuillage ont pu, à l'opposé, reconstituer au moins partiellement leurs stocks de réserves à partir de la photosynthèse de l'arrière-saison. Les conifères manifestent très peu cette limitation de surface foliaire (seuls les Tsugas et Thujas ont perdu plus de 50 % de leur feuillage brun et desséché), et les potentiels atteints ont souvent été critiques, c'est-à-dire accompagnés d'une très forte régulation stomatique. Dans ce cas, les tissus foliaires ont été exposés à des échauffements violents avec des brûlures d'aiguilles, des brunissements ou rougissements. Soulignons aussi que les résineux sont pour la plupart sensibles à la sécheresse atmosphérique (déficit de saturation de l'air), ce qui contribue à la fermeture précoce de leurs stomates et à l'échauffement des aiguilles.

Enfin, il est intéressant de comparer ce classement en fonction de l'adaptation des essences aux conditions hydriques des milieux au classement, plus familier des gestionnaires forestiers, des

FIGURE 12 RELATION ENTRE LE "CARACTÈRE HYDRIQUE" DE QUELQUES ESSENCES FORESTIÈRES SELON RAMEAU ET AL. (1989) ET LE POTENTIEL HYDRIQUE INDUISANT 50 % DE PERTE DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE PAR EMBOLIE DU SYSTÈME CONDUCTEUR

Le potentiel hydrique induisant 50 % de perte de conductivité hydraulique du système conducteur est la limite au-delà de laquelle il y a risque de généralisation de l'embolie à tout le système conducteur.

Les symboles sont des ronds pour les feuillus et des étoiles pour les conifères.



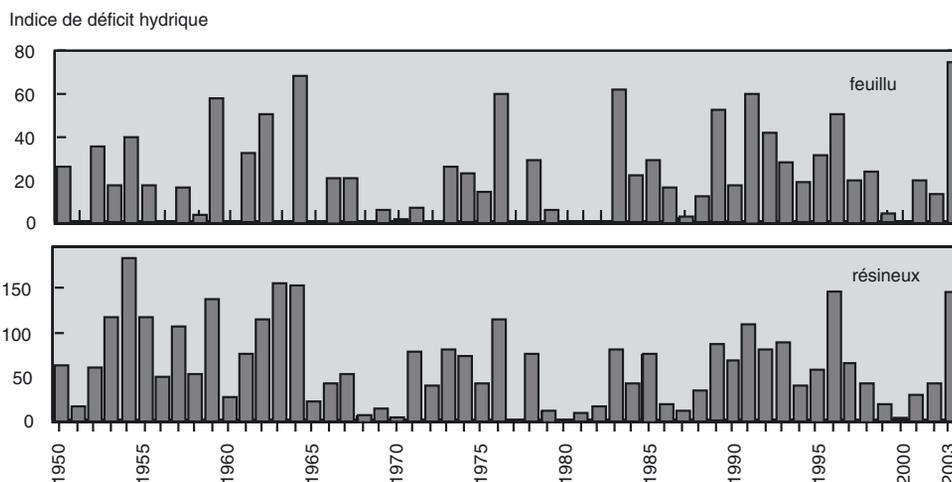
caractères autécologiques des essences. La figure 12 (p. 125) illustre une interprétation écophysiological de ce classement repris dans la *Flore forestière française* (Rameau *et al.*, 1989). Cette représentation fait nettement apparaître une plus forte sensibilité à la sécheresse des feuillus par rapport aux résineux, et une diversité écophysiological au sein de chaque grand type d'essences, qui n'est pas reliée à l'anatomie mais bien à un ensemble de propriétés de contrôle des transferts hydriques à la fois en phase liquide et en phase vapeur.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS DANS LE CONTEXTE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Même si la Lorraine n'est pas réputée pour ses étés chauds et ensoleillés, cette analyse comparative des contraintes hydriques en forêt au cours de la série climatique 1950-2003 permet de souligner que la fréquence d'apparition d'un déficit hydrique est assez élevée : sur ces 54 dernières années, 9 années seulement n'ont présenté aucun déficit hydrique. Plusieurs études dendroécologiques⁽⁷⁾ montrent d'ailleurs que les déficits hydriques dans l'Est de la France expliquent la plupart des variations entre années de la croissance de nos forêts. Enfin, si l'analyse strictement climatologique est insuffisante, un calcul de bilan hydrique est recommandé pour caractériser et comparer les sécheresses et leurs incidences possibles sur les peuplements forestiers (Bréda, 1996).

Sur les 54 dernières années, cette figure ne met pas en évidence de tendance à l'augmentation des déficits hydriques (figure 13, ci-dessous). Par contre, nos calculs révèlent la plus forte précocité des déficits hydriques sous résineux au cours de la période 1950-1964 (en moyenne, jour 90, début avril) par rapport à la période récente (jour 149, fin mai en moyenne), soit en moyenne 50 jours plus tard qu'il y a cinquante ans (données annuelles non présentées ici). Ceci est

FIGURE 13 DÉFICIT HYDRIQUE CALCULÉ PAR MODÉLISATION JOURNALIÈRE DE BILAN HYDRIQUE SOUS PEUPEMENT FEUILLU (EN HAUT) OU RÉSINEUX (EN BAS) POUR UN INDICE FOLIAIRE DE 6 ET UNE RÉSERVE UTILE DU SOL DE 175 MM (DONNÉES MÉTÉO MESURÉES OU RECONSTRUITES POUR LE SITE ATELIER DE HESSE, MOSELLE)



(7) Ces études visent à expliquer les variations interannuelles de croissance des arbres à l'aide de données stationnelles et bioclimatiques, dont le bilan hydrique. La croissance des arbres est mesurée rétrospectivement à l'aide des largeurs annuelles des cernes.

cohérent avec les prévisions des climatologues qui prédisent, dans le contexte du réchauffement climatique pour l'Europe de l'Ouest, une augmentation de la pluviométrie hivernale et une baisse en période estivale (GIEC⁽⁸⁾, 2002). Ceci conduirait donc à un meilleur remplissage de la réserve en eau des sols en hiver et, par conséquent, à des déficits hydriques moins précoces sous résineux. Ceci pourrait être favorable à leur croissance, d'autant plus si des températures clémentes se reproduisent à l'arrière-saison, mais dans la mesure seulement où les sécheresses estivales n'atteindraient pas des seuils susceptibles d'induire des dépérissements. Les conditions thermiques et pluviométriques de 2003 confirment qu'une pluviométrie hivernale et printanière importante, qui permet de constituer des stocks importants dans des sols suffisamment profonds, permet de limiter la contrainte hydrique (et les dommages associés) aux forêts. Plusieurs travaux ont par ailleurs mis en évidence l'effet antitranspirant de l'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère. Les mesures de contraintes hydriques mesurées au cours de l'été 2003 montrent que, même si cet effet existe, le déficit hydrique demeure une réalité à prendre très au sérieux. En outre, une essence sensible au déficit hydrique comme le Hêtre n'est, d'après les travaux de Mousseau *et al.* (1996), que très peu voire pas protégée par l'augmentation de concentration de CO₂. Cette essence semble au total très vulnérable aux sécheresses.

Même s'il faut rester très prudent sur les conséquences directes de ces événements climatiques pour le fonctionnement et la survie des arbres forestiers, nos connaissances et l'analyse des sécheresses passées permettent de formuler quelques éléments de prédiction pour l'année ou les années à venir.

Tout d'abord, rappelons les principaux résultats d'une enquête menée auprès des gestionnaires forestiers⁽⁹⁾ après la sécheresse de 1976 (Aussenac, 1978). Les dégâts avaient été massifs sur les plantations, avec parfois jusqu'à 100 % de mortalité dans celles de l'automne 1975 et du printemps 1976. Ceci risque malheureusement de se reproduire dans les nombreuses plantations réalisées en reconstitution après la tempête de 1999, et particulièrement dans les plus récentes. Un inventaire précis sera intéressant à analyser, en fonction non seulement des essences mais aussi des techniques de plantation, de la qualité des plants et des propriétés des sols. Cette analyse et une synthèse des observations seront confiées au Département de la Santé des Forêts. Dans les peuplements de 5 à 10 ans, les dégâts après 1976 avaient été moins sévères mais fortement dépendants du type de sol et de l'importance du couvert. Dans les peuplements de 50 ans et plus, les dégâts avaient été plus diffus avec des mortalités d'arbres isolés. Les Bouleaux et Charmes, qui avaient perdu leurs feuilles en juillet et août, ont survécu. En revanche, des dessèchements de cimes s'étaient produits chez le Hêtre. Les essences de reboisement les plus touchées par la sécheresse avaient été les Mélèzes, les Épicéas commun et de Sitka et le Douglas. Des dégâts avaient également été signalés sur Pins sylvestre et noir, dans les stations à sols superficiels. Enfin, bien que peu utilisés en reboisement, *Chamaecyparis lawsoniana*, *Thuja plicata*, *Tsuga heterophylla* étaient des espèces particulièrement atteintes. Nos observations réalisées en septembre 2003 dans l'Arboretum d'Amance confirment malheureusement ces observations et les premières mortalités observées sur les essences introduites concernent les Tsugas, Mélèzes, Douglas, Thuyas. Nos observations seront poursuivies en 2004, car notre inventaire exhaustif de septembre 2003 a révélé des symptômes parfois sévères (colorations anormales, pertes d'aiguilles ou de feuilles), en particulier parmi les résineux exotiques.

Par ailleurs, comme l'ont rappelé Landmann *et al.* (2003), les travaux sur des cas de dépérissements forestiers aussi bien feuillus (Chêne, Hêtre) que résineux (Sapin) ont clairement démontré

(8) Le GIEC est un Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

(9) Cette enquête auprès de l'Office national des Forêts, des services des forêts et du Centre régional de la Propriété forestière Rhône-Alpes devait préciser quels avaient été les effets du déficit hydrique exceptionnel de 1976 (voir aussi les études de Monnier, 1976, et Marion, 1976).

le rôle majeur de la sécheresse. Ainsi, l'initiation de dépérissements du Chêne pédonculé et du Sapin pectiné a été largement attribuée à des années sèches affectant des arbres hors station (Chêne pédonculé), poussant sur des sols à faible réserve hydrique (Sapin) ou mal rétablis de périodes antérieures difficiles en raison d'une concurrence marquée pour l'eau lors de ces épisodes (Aussenac, 1978 ; Becker et Lévy, 1982 ; Lévy et Becker, 1987 ; Bréda, 1999a ; Bréda *et al.*, 1999). Ces expériences nous ont appris à comprendre pourquoi certaines zones sont particulièrement exposées aux risques de dépérissement (espèces hors stations, peuplements trop denses, sols ingrats ; la conjonction de ces facteurs étant particulièrement défavorable). Ceci devrait inciter les gestionnaires à une surveillance phytosanitaire attentive et soutenue dans le temps des peuplements à risque, et éventuellement à agir rapidement par toute opération sylvicole permettant d'améliorer les conditions locales de récupération des arbres. À plus long terme, on ne peut que conseiller l'anticipation de ces situations extrêmes en évitant de maintenir des indices foliaires trop élevés surtout sur les sols à réserves utiles faibles et moyennes.

Depuis 1976, l'écophysiologie forestière a fait des progrès importants : on connaît mieux les limites de fonctionnement de la plupart des espèces, les mécanismes de dysfonctionnements hydrauliques induits par les sécheresses exceptionnelles ont pu être démontrés et la variabilité entre les espèces du couplage entre circulation de l'eau à l'état liquide (sève brute) et la régulation de la transpiration a été prospectée. Ces connaissances récentes ont été confortées par les observations de la réaction des arbres au cours de l'été 2003. Enfin, si les travaux de dendro-écologie avaient déjà clairement démontré les effets différés de tels accidents climatiques, notre meilleure compréhension récente du rôle des réserves glucidiques des arbres dans leur survie devrait nous aider à en comprendre les mécanismes.

Pour conclure, il nous semble important de souligner que les conséquences de ces accidents climatiques seront modulées par le climat des années à venir (rigueur des hivers, excès d'eau ou nouvelles sécheresses). De plus, pour un climat donné, une forte disparité pourra apparaître entre individus selon le statut social et l'état de santé des arbres en début de saison de végétation 2003 : les individus, déjà affaiblis par des contraintes passées (tempête de 1999, défoliations, maladies racinaires...) seront plus vulnérables que les arbres sains. Enfin, l'expérience acquise dans le domaine des dépérissements nous amène à rappeler que le contexte phytosanitaire (insectes ravageurs, champignons pathogènes) pèsera fortement sur la dynamique de dépérissement éventuellement enclenchée par la sécheresse. À l'opposé, même si la majorité des arbres survit à ces accidents climatiques grâce à de surprenantes capacités de réaction, nos forêts resteront marquées dans leur croissance, leurs indices foliaires chuteront au moins en 2004 et plusieurs années seront sans doute nécessaires pour retrouver un état physiologique et sanitaire satisfaisant. En ajustant l'indice foliaire des peuplements à la réserve en eau du sol, le forestier peut agir par sa gestion sur la diminution de l'intensité et de la durée des déficits hydriques (Bréda, 1995 ; Aussenac, 2000 ; Bréda et Roman-Amat, 2002). Si l'intensité des déficits hydriques estivaux devait augmenter comme le prédisent les simulations climatiques sous hypothèse de changement global, cette recommandation vers des couverts plus clairs ne serait qu'encre plus pertinente. Le travail du forestier est de choisir préventivement les individus à supprimer par éclaircie plutôt que de subir une sélection par les événements climatiques extrêmes et les dépérissements qui en résultent.

Nathalie BRÉDA – André GRANIER – Gilbert AUSSENAC
 UMR INRA-UHP 1137
 Écologie et Écophysiologie forestières
 INRA
 F-54280 CHAMPENOUX
 (breda@nancy.inra.fr)
 (agranier@nancy.inra.fr)
 (aussenac@nancy.inra.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- AMEGLIO (T.), ARCHER (P.), COHEN (M.), VALANCOGNE (C.), DAUDET (F.A.), DAYAU (S.), CRUIZIAT (P.). — Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. — *Plant and Soil*, n° 207, 1999, pp. 155-167.
- AUSSENAC (G.). — Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 27, 1970, pp. 383-399.
- AUSSENAC (G.). — Comportement hydrique de rameaux excisés de quelques espèces de Sapins et de Pins noirs en phase de dessiccation. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 37, 1980, pp. 201-215.
- AUSSENAC (G.). — Interactions between forest stands and microclimate : Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, 2000, pp. 287-301.
- AUSSENAC (G.). — Premiers résultats d'une étude de l'influence de l'alimentation en eau sur la croissance des arbres dans un peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). — *Revue forestière française*, vol. XXXII, n° 2, 1980, pp. 167-172.
- AUSSENAC (G.). — Le Potentiel hydrique de l'arbre. Une donnée essentielle pour la compréhension de l'écophysologie des essences forestières. — *Science du Sol*, vol. 4, 1985, pp. 217-226.
- AUSSENAC (G.). — La Sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XXX, n° 2, 1978, pp. 103-114.
- AUSSENAC (G.), BOULANGEAT (C.). — Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 37, 1980, pp. 91-107.
- AUSSENAC (G.), GRANIER (A.). — Quelques résultats de cinétique journalière du potentiel de sève chez les arbres forestiers. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 35, 1978, pp. 19-32.
- AUSSENAC (G.), GRANIER (G.), BRÉDA (N.). — Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 1, 1995, pp. 54-61.
- AUSSENAC (G.), VALETTE (J.-C.). — Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 39, 1982, pp. 41-62.
- BADALOTTI (A.), ANFODILLO (T.), GRACE (J.). — Evidence of osmoregulation in *Larix decidua* at Alpine tree line and comparative responses to water availability of two co-occurring evergreen species. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, 2000, pp. 623-633.
- BECKER (M.), LÉVY (G.). — Le Dépérissement du Chêne en forêt de Tronçais : les causes écologiques. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 39, 1982, pp. 439-444.
- BRÉDA (N.). — Bilan hydrique et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des Chênes. — Rapport final Inter-région *Dépérissement forestier en vallée du Rhin*. — 1999b. — 60 p.
- BRÉDA (N.). — Ground-based measurements of leaf area index : a review of methods, instruments and current controversies. — *J. Exp. Bot.*, vol. 54, 2003, pp. 2403-2417.
- BRÉDA (N.). — L'Indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2, 1999a, pp. 135-150.
- BRÉDA (N.). — Séquences climatiques et successions de sécheresses : outils d'analyse et exemples sur la période 1979-1994. — *Les Cahiers du DSF*, n° 1-1996 [La santé des forêts (1995)]. — Paris : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (DERF). — pp. 45-47.
- BRÉDA (N.), COCHARD (H.), DREYER (E.), GRANIER (A.). — Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 50, 1993, pp. 571-582.
- BRÉDA (N.), GRANIER (A.), BARATAUD (F.), MOYNE (C.). — Soil water dynamics in an oak stand. 1. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. — *Plant and Soil*, vol. 172, 1995, pp. 17-27.
- BRÉDA (N.), LEFÈVRE (Y.), BADEAU (V.). — Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. — *La Houille Blanche*, n° 3 spécial "Forêts et Eau", 2002, pp. 25-40.
- BRÉDA (N.), PEIFFER (M.), DUPOUEY (J.-L.), GEREMIA (F.), SCHIPFER (R.), KIEFFER (C.). — Le Rôle clé des déficits hydriques dans le dépérissement de chênaies en forêt de la Harth (Alsace du Sud) établi par une analyse dendroécologique et écophysologique. — *Les Cahiers du DSF*, 1-1999 [La santé des forêts (1998)]. — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (DERF), 1999. — pp. 92-94.

- BRÉDA (N.), ROMAN-AMAT (B.). — Impact de la conduite des peuplements forestiers sur les ressources en eau. — *La Houille Blanche*, n° 3 spécial "Forêts et Eau", 2002, pp. 78-84.
- COCHARD (H.). — Vulnerability of Several Conifers to Air Embolism. — *Tree Physiology*, n° 11, 1992, pp. 73-83.
- COCHARD (H.), BRÉDA (N.), GRANIER (A.). — Whole tree hydraulic conductance and water loss regulation in *Quercus* during drought : evidence for stomatal control of embolism ? — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, 1996, pp. 197-206.
- COCHARD (H.), BRÉDA (N.), GRANIER (A.), AUSSENAC (G.). — Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea*, *Q. pubescens*, *Q. robur*). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 49, 1991, pp. 225-233.
- COCHARD (H.), LEMOINE (D.), DREYER (E.). — The effects of acclimation to sunlight on the xylem vulnerability to embolism in *Fagus sylvatica* L. — *Plant Cell Environ.*, vol. 22, 1999, pp. 101-108.
- COCHARD (H.), PEIFFER (M.), LEGALL (K.), GRANIER (A.). — Developmental control of xylem hydraulic resistances and vulnerability to embolism in *Fraxinus excelsior* L. : impacts on water relations. — *J. Exp. Botany*, vol. 48, 1997, pp. 655-663.
- DÉPARTEMENT DE LA SANTÉ DES FORÊTS. — Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelle incidence visuelle sur les peuplements forestiers ? — *Information Santé des Forêts*, février 2004, 8 p.
- DREYER (E.), LE ROUX (X.), MONTPIED (P.), DAUDET (F.A.), MASSON (F.). — Temperature response of leaf photosynthetic capacity in seedlings from seven temperate tree species. — *Tree Physiol.*, vol. 21, 2001, pp. 223-232.
- FROUX (F.), HUC (R.), DUCREY (M.), DREYER (E.). — Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). — *Annals of Forest Science*, vol. 59, 2002, pp. 409-418.
- GHOUIL (H.), MONTPIED (P.), EPRON (D.), KSONTINI (M.), HANCHI (B.), DREYER (E.). — Thermal optima of photosynthetic functions and thermostability of photochemistry in cork oak seedlings. — *Tree Physiology*, vol. 23, 2003, pp. 1031-1039.
- GIEC. — Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques. — Rapport OMM, PNUE, 2002. — 97 p. (<http://www.ipcc.ch/>).
- GRANIER (A.), BADEAU (V.), BRÉDA (N.). — Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 59-68.
- GRANIER (A.), BRÉDA (N.), BIRON (P.), VILLETTE (S.). — A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. — *Ecological Modelling*, vol. 116, 1999, pp. 269-283.
- JONES (H.G.), SUTHERLAND (R.A.). — Stomatal Control of Xylem Embolism. — *Plant Cell Environ.*, vol. 14, 1991, pp. 607-612.
- LANDMANN (G.), BRÉDA (N.), HOULLIER (F.), DREYER (E.), FLOT (J.-L.). — Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? — *Revue forestière française*, vol. LV, n° 3, 2003, pp. 299-306.
- LEBOURGEOIS (F.), BRÉDA (N.), GRANIER (A.). — Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en termes de conséquences pour les écosystèmes forestiers. — *Annals of Forest Science*, vol. 58, 2001, pp. 733-754.
- LÉVY (G.), BECKER (M.). — Le Dépérissement du Sapin dans les Vosges : rôle primordial des déficits d'alimentation en eau. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 44, 1987, pp. 403-416.
- LU (P.), BIRON (P.), GRANIER (A.), COCHARD (H.). — Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) under soil drought in the Vosges mountains : Whole-tree hydraulic. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, 1996, pp. 113-121.
- MARION (J.-E.). — Quelques conséquences de la sécheresse pour les sylviculteurs. — *Bulletin de vulgarisation forestière*, n° 76/9, 1976.
- MATHIEU (A.), FLICHE (P.). — Flore forestière. — 4^e édition. — Paris : Baillière ; Nancy : Jacques, 1897. — 705 p.
- MEDLYN (B.E.), DREYER (E.), ELLSWORTH (D.), FORSTREUTER (M.), HARLEY (P.C.), KIRSCHBAUM (M.U.F.), LE ROUX (X.), MONTPIED (P.), STRASSEMAYER (J.), WALCROFT (A.), WANG (K.), LOUSTAU (D.). — Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. — *Plant, Cell Environ.*, vol. 25, 2002, pp. 1167-1179.
- MONNIER (Y.). — Les Conséquences de la sécheresse. — *Bulletin d'information de l'Office national des Forêts*, n° 40, 1976, pp. 10-16.

- MOUSSEAU (M.), DUFRENE (E.), ELKOHEN (A.), EPRON (D.), GODARD (D.), LIOZON (R.), PONTAILLER (J.-Y.), SAUGIER (B.). — Growth strategy and tree response to elevated CO₂ : A comparison of beech (*Fagus sylvatica*) and sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.). — *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*, 1996, pp. 71-86.
- RAMEAU (J.-C.), MANSION (D.), DUMÉ (G.). — Flore forestière française. Tome 1 : Plaines et collines. — Paris : Institut pour le Développement forestier, 1989.
- ROBAKOWSKI (P.), MONTPIED (P.), DREYER (E.). — Temperature response of photosynthesis of silver fir (*Abies alba* Mill.) seedlings. — *Annals of Forest Science*, vol. 59, 2002, pp. 159-166.
- SCHUTT (P.), KOCH (W.), BLASCHKE (H.), LANG (K.J.), SCHUCK (J.), SUMMER (H.). — Avant que Forêt ne meure. — Paris : Delachaux et Niestlé ; Y. Peret Eds, 1984.
- SPERRY (J.S.), NICHOLS (K.L.), SULLIVAL (J.E.M.), EASTLACK (S.E.). — Xylem embolism in ring-porous, diffuse-porous, and coniferous trees of northern Utah and interior Alaska. — *Ecology*, vol. 75, 1994, pp. 1736-1752.
- SPERRY (J.S.). — Hydraulic constraints on plant gas exchange. — *Agric. For. Meteorol.*, vol. 104, 2000, pp. 13-23.
- TYREE (M.T.), COCHARD (H.), CRUIZIAT (P.), SINCLAIR (B.), AMEGLIO (T.). — Drought-Induced Leaf Shedding in Walnut - Evidence for Vulnerability Segmentation. — *Plant Cell Environ.*, vol. 16, 1993, pp. 879-882.
- TYREE (M.T.), SPERRY (J.S.). — Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress ? Answers from a model. — *Plant Physiol.*, vol. 88, 1988, pp. 574-580.
- VIVIN (P.), AUSSENAC (G.), LÉVY (G.). — Influences of soil drought and fertilization on the gas exchanges, the growth and the survival of three oak species (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus robur* L. and *Q. rubra* L.) cultivated in buried containers. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 50, 1993, pp. 221-233.

LA SÉCHERESSE DE 2003 DANS LE CONTEXTE CLIMATIQUE DES 54 DERNIÈRES ANNÉES : ANALYSE ÉCOPHYSIOLOGIQUE ET INFLUENCE SUR LES ARBRES FORESTIERS [Résumé]

Après avoir rappelé comment caractériser une sécheresse pour en évaluer ses conséquences sur le fonctionnement des arbres, l'analyse du bilan hydrique de l'année 2003 en Lorraine est présentée, pour des peuplements feuillus et résineux, et sur des sols à réserve utile moyenne ou forte. La sécheresse 2003 est replacée dans la chronologie des 54 dernières années, avec une comparaison détaillée avec l'année 1976. Le déficit hydrique de l'année 2003 apparaît comme le plus fort des 54 dernières années pour les feuillus. Pour les résineux, 2003 se classe au second rang pour les sols à réserve utile moyenne, et seulement en 5^e rang pour les sols profonds. Les conséquences sur la physiologie des arbres sont présentées, et les potentiels hydriques atteints par les arbres en 2003 sont discutés. Cet article compare en particulier un large éventail d'espèces autochtones ou introduites en termes de stratégies de réponses à la sécheresse édaphique (vulnérabilité et risque de cavitation, régulation stomatique, développement du système racinaire).

THE 2003 DROUGHT IN THE CLIMATE CONTEXT OF THE LAST 54 YEARS - ECOPHYSIOLOGICAL ANALYSIS AND IMPACT ON FOREST TREES [Abstract]

The article begins with a description of how soil water balance is calculated and how drought parameters relate to tree water status. Soil water balance progression during 2003 in Lorraine is presented for coniferous and broad-leaved stands, according to extractable soil water. The 2003 drought is placed within a time series (54 years), with special attention given to the comparison between 1976 and 2003. The soil water deficit in 2003 is the largest observed in the last 54 years for broad-leaved species. For conifers, the 2003 drought ranks as the second worst for soils with low extractable soil water and 5th for deep soils. Consequences of drought on tree physiology are presented and tree leaf water potentials during the summer of 2003 are discussed. Responses to soil water shortage are compared for a wide range of both native and non-native forest species, including vulnerability and risk of cavitation, stomatal control, root system development.