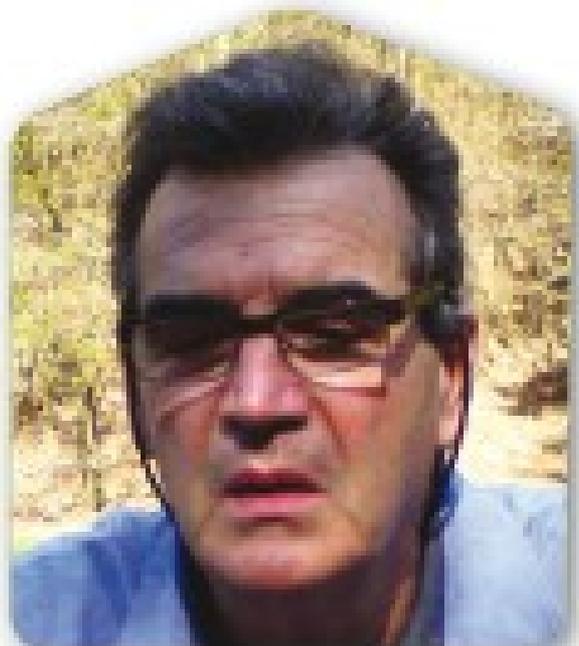


Plein
champ sur la
biodiversité

6^e
édition



Changements climatiques :
méthode d'identification et de cartographie
du degré de vulnérabilité au stress hydrique
des principales essences forestières d'Alsace
selon une approche synécologique

Richard Bœuf

Phytoécologue et phytoso-
clogue, retraité de l'ONF



LYCÉES
AGRICILES
pour la
BIODIVERSITÉ



Grand Est
ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE

Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Alsace :
localisation en
France et en
Europe



Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Dans le futur
quel sera
l'impact du
réchauffement
global sur les
forêts ?

Ici, dans les
VDN, une
Hêtraie du
Luzulo-Fagion

Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Ici un brouillard de pollen de Sapin dans la Hêtraie-Sapinière de l'*Abietion* Issler 1931

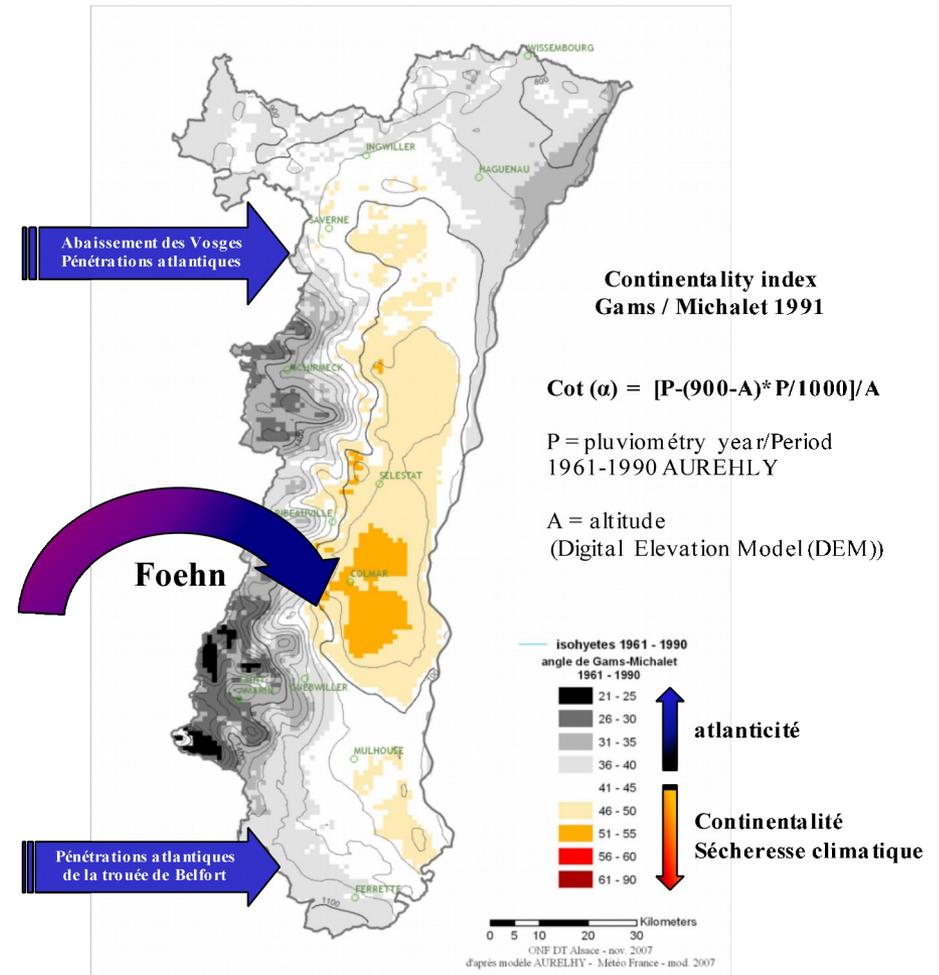
Comment apprécier cet impact ?

Quel avenir pour les principales essences forestières zonales ?



Les grandes zones bioclimatiques de l'Alsace selon l'Angle de GAMS-MICHALET

Il montre clairement les différentes zones bioclimatiques générées par les différentes influences climatiques qui règnent sur la région



Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Matériel et Méthode : synoptique

1/ données de base

2/ Unités élémentaires RU

3/ Type fonctionnel et RU

4/ Acquisition de données

5/ statistiques, valeurs seuils

6/ Cartes

Plus de 530 Stations catalogues

260 stations guide

194 000 ha
Cartes de stations

Rattachements phytosociologiques
Estimation de la Réserve Utile

32 Types fonctionnels phytosociologiques

Calculs des bilans d'eau (ETP, ETR, D %....)
Par maille AUREHLY (8134 pts) et 757 446 polygones

Cartes de vulnérabilité des essences, des types fonctionnels à partir d'un mixage de tous les scénarios B2 et A2 de chaque modèle

Classification dans 4 niveaux de vulnérabilité selon les conditions présentes et futures

Fixation des seuils de vulnérabilité selon les types fonctionnels

Analyses statistiques ANOVA
D%, altitude / type fonctionnel

Acquisition :
⇒ Données météo AUREHLY
61_1990 ; 71_2000 ; 81_2010 ; 2003
⇒ Modèle radiatif Rg (mailles 50 x 50 m)
⇒ Importation données de 6 modèles climatiques :
CCMA (C); CSIRO (AU); HadCM3 (E); NCCCSM (US); NIESS (J); MPIM (G)

Matériel et Méthode : relations stations, type fonctionnel et RU

Exemple :

**Hêtraie-Sapinière
Neutrophile à acidiline**

**= 10 types de stations
en Alsace**

= *Abietion*

Type de station	RU (mm)	Type fonctionnel
JA_5	50	<i>Abietion</i>
JA_6	35	
JA_8	65	
JA_9	100	
JA_10	125	
JA_11	90	
VA_7	90	
VA_9	100	
VA_10	90	
CSVE_20	70	

JA = Jura Alsacien / VA = Vosges Alsaciennes
CSVE = Collines sous-vosgiennes Est

Matériel et Méthode : calcul du D%

ETP : Turc (1961), Thornthwaite (1948), Hargreaves (2003)

$$\text{ETP (Turc)} = (\text{mm/ n days}) = n \times 0,13 \times (\text{Rg}) + 50 \times (t/t+15)$$

n = période considérée : ex. Janvier = 31, février = 28 ou 29 etc.

Rg = Radiation globale (calorie/cm² /jour) = valeurs radiatives

[cf. **PIÉDALLU & GÉGOUT (2007, 2008)** à la maille de 50 m].

ETR : Thornthwaite 1957 :

décroissance exponentielle de la RU selon les déficits cumulés
Niveau de RU

$$> \text{RU} * \exp[\Sigma \text{ déficits cumulés } / (0,98 * \text{RU})]$$

D% : HOUZARD (1984) = Index d'aridité (THORNTHWAITE 1948)

cf. **ARLETY et al. 1954, AUSSENAC & DUCREY (1974)**

$$\Rightarrow \text{D\%} = [100 (\text{ETP-ETR}/\text{ETP})]$$

Tous les résultats catégorisés [type fonctionnel/D% et type fonctionnel /altitude] sont très significatifs ($p < 0.000$)

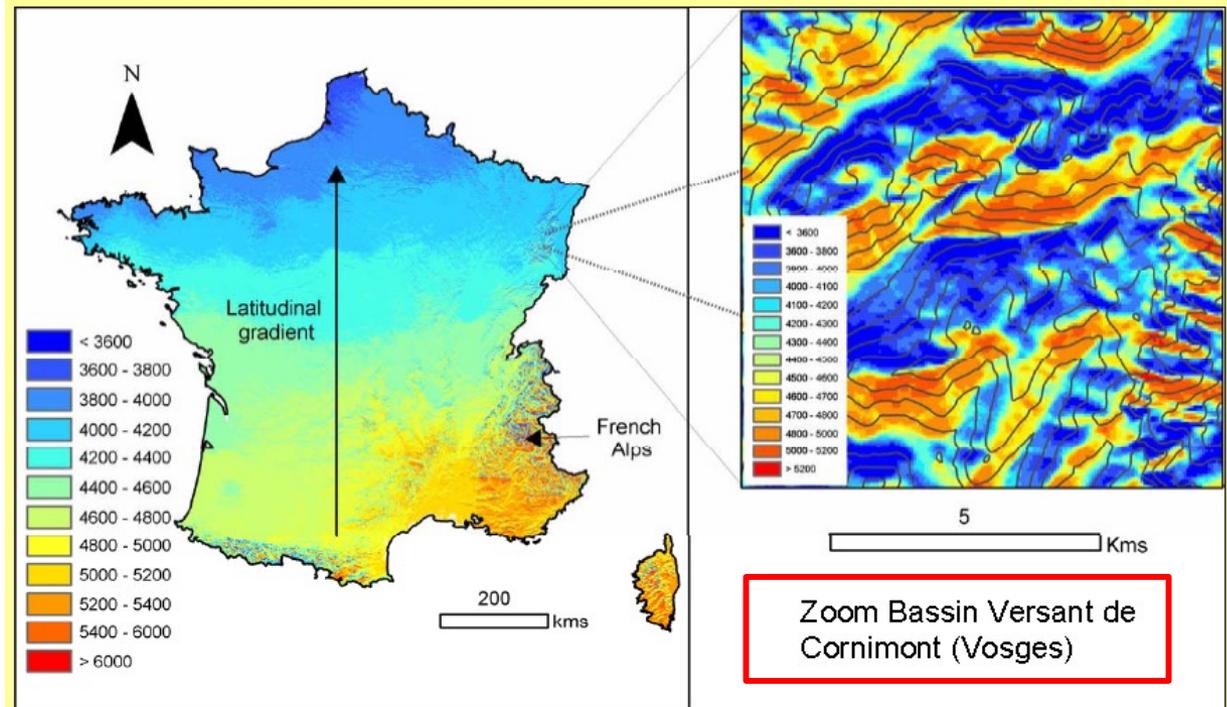
Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Matériel et Méthode : calcul du D%

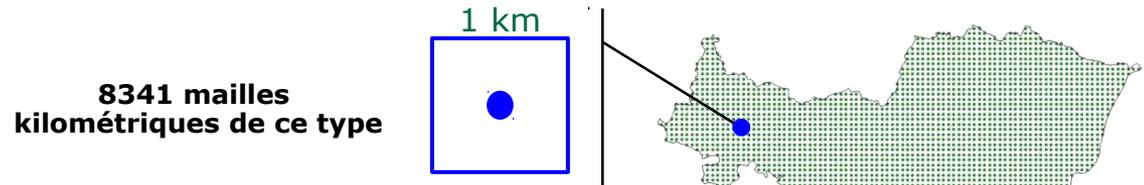
Utilisation des valeurs radiatives Rg globales annuelles à la maille 50 x 50 m selon **LEBOURGEOIS et al. 2006**

Le Rg met bien en évidence les oppositions de versants, ce qui se traduit dans les calculs du D%

Cartographie Rg annuelles



Matériel et Méthode : calculs du D%, grille Aurehly



❖ Acquisition des données AUREHLY (BÉNICHOU & LEBRETON 1986)

(= Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie)

⇒ 8341 pts (P et t°C /mois, maille 1 x 1 km), sur l'Alsace

- ✓ Normale 1961-1990
- ✓ Normale 1970-2000
- ✓ Normale 1981-2010
- ✓ Année 2003

- ✓ Calculs ETP pour chaque point extrapolé à la maille

Matériel et Méthode : calculs du D%, modèles climatiques



❖ **Acquisition des données de 6 modèles climatiques**, notamment les scénarios de type B2, A1B et propres à chaque modèle

✓ **Trois modèles**

[CCCMA (Australien), CSIRO (Canadien), HadCM3 (Anglais)] ont téléchargés à partir du site WWW.wordclim.org/, qui offrent **résolution spatiale kilométrique ou sub kilométrique selon latitude (Hijmans *et al.* 2005), comparable à celle d'AUREHLY**

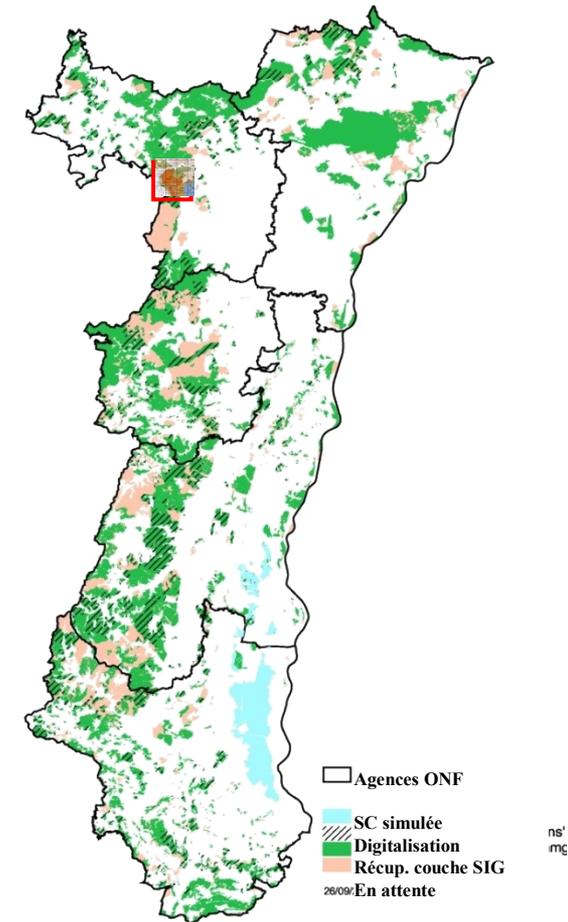
✓ **Trois autres modèles**

[NCCCSM (Américain), NIESS (Japonais), MPIM (Allemand)] ont téléchargés à partir du site WWW.IPCC-data.org/ qui, compte de leur faible résolution spatiale (entre 90 et 200 km) ont été déclinés à la maille AUREHLY à partir de la méthode des de

Matériel et Méthode : calculs du D%, visualisation

- ❖ Selon les données de l'IFN) avec 316 410 ha (dont 236 330 ha de FP) et un taux de boisement de 38%, l'Alsace se présente comme l'une des cinq régions les plus boisées du pays

La cartographie des stations en Alsace porte sur 194 000 ha de forêts publiques cartographiées selon les guides de stations.



Matériel et Méthode : calculs du D%, visualisation

❖ Exemple d'application dans les VDN sur les forêts communales aux environs d'Oberhof (67)

Ici cinq types de stations mais quatre types fonctionnels :

Luzulo-Fagion

Abietion

Carpino-Fagion hydromorphe

Carpino-Fagion

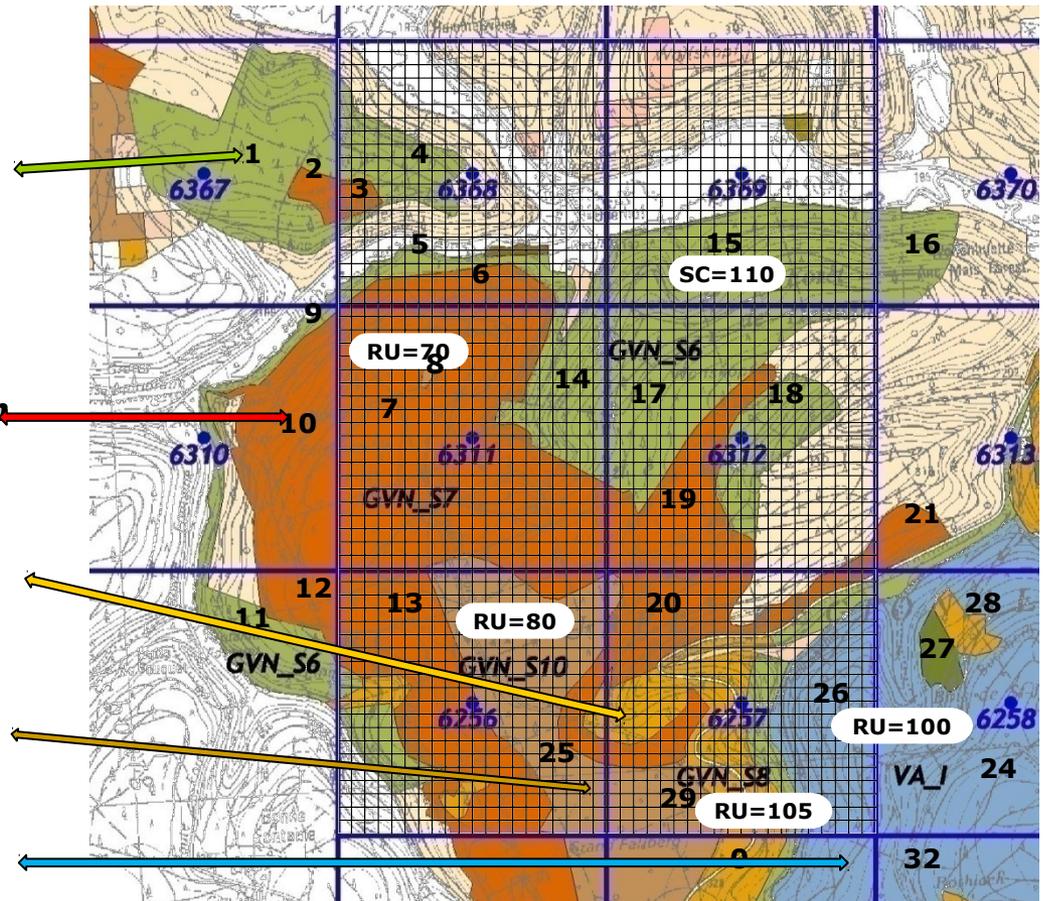
GVN_6 =
Luzulo-Fagetum festucetosum
[Luzulo-Fagion]

GVN_7 =
Festuco-Abietetum
[Abietion]

GVN_8 =
Deschampsio-Fagetum
[Carpino-Fagion]

GVN_10 =
[Carpino-Fagion hydromorphe]

VA_I =
[Carpino-Fagion]



Matériel et Méthode : calcul du D%, visualisation

Comparaison du D% de cinq zones climatiques calculé avec des valeurs de RU de 50, 70 and 100 mm sur la période de référence 1961-1990

Les cinq types fonctionnels potentiels représentés sont :

Abietion

Carpino-Fagion

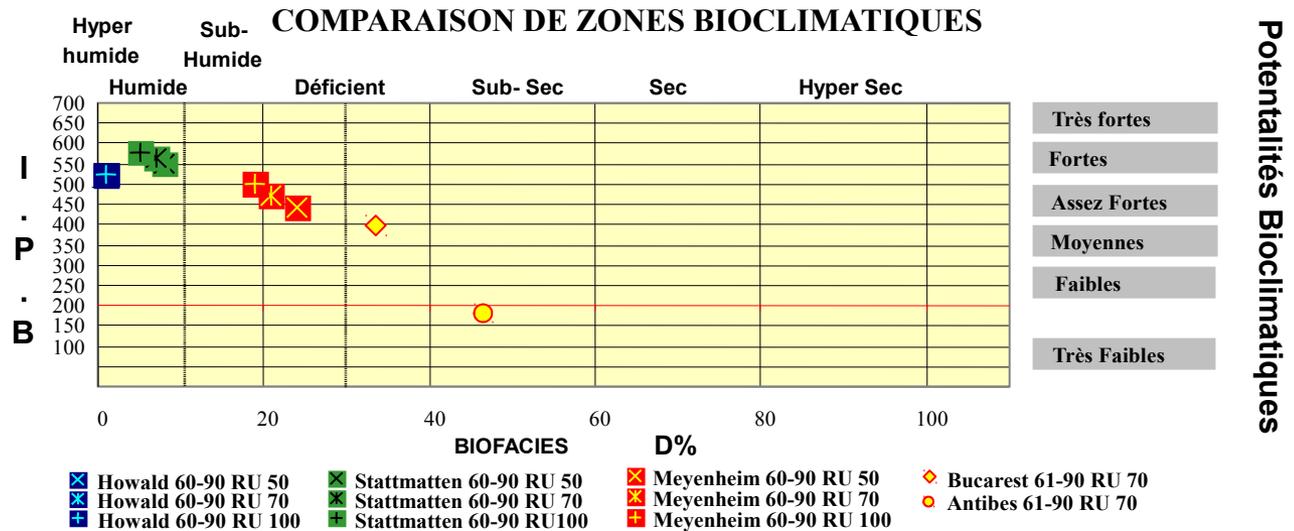
Carpinion betuli

Carpinion orientalis

Quercion illicis

➡ importance non négligeable de la RU dans le calcul du D%

	altitude	1961-1990	
		P mm	t°C
Le Howald	600	1213	8
Stattmatten	120	844	10,2
Oberentzen	207	583	10,2
Bucarest	90	611	11,1
Antibes	47	779	15,6



Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Valeurs moyennes de T, P et D% par scénario selon AUREHLY et les sept modèles

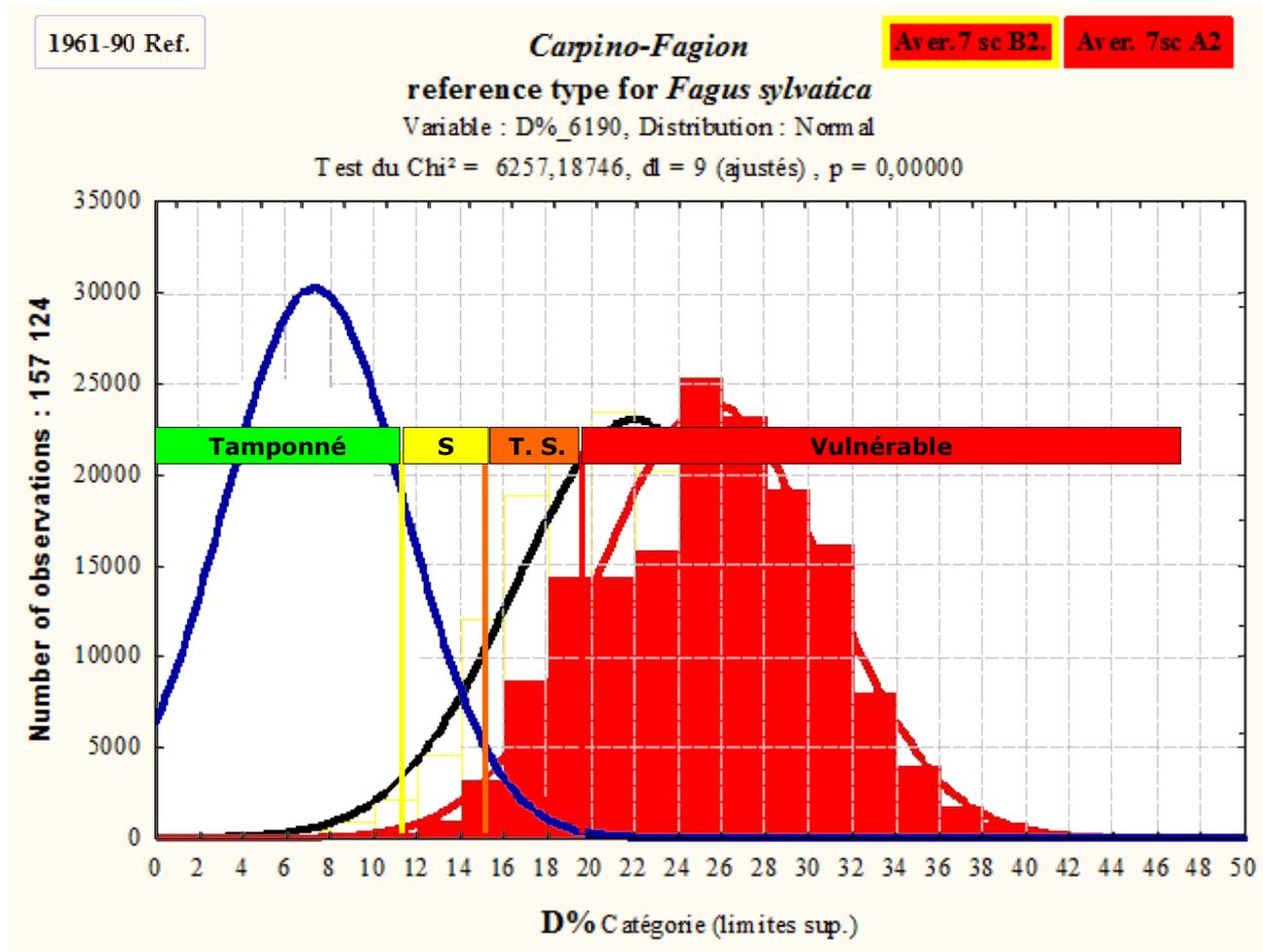
Classement des modèles et des scénarios selon le D% pv calculé sur les 757 446 polygones

	AUREHLY				scenarios ONF		3th report IPCC data Word Clim						4th report IPCC data IPCC						
	T	1961 1990	1971 2000	1981 2010	2003	2071 2100 s2003	2071 2100 a2003	Australian		Canadian		English		American		Japanese		German	
		CSIRO	CCCMA		HADCM3		NCCCSM		NIESS		MPIM		B2-A1B	A2	B1-A1B	A2	B1-A1B	A2	
	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2-A1B	A2	B1-A1B	A2	B1-A1B	A2	
TM AN	9,44	9,75	10,21	11,04	12,4	13,1	12,6	13,4	11,7	12,6	12,1	13,4	11,7	13,2	13,6	14,5	12,2	13,2	
Δ°C	Ref.	0,31	0,58	1,6	3,0	3,6	3,1	4,0	2,3	3,2	2,7	4,0	2,3	3,7	4,2	5,0	2,8	3,7	
P_AN	877	870	924	656	865	775	809	799	728	679	704	671	827	829	726	693	584	554	
Δ mm		-8	47	-221	-12	-102	-68	-79	-149	-198	-173	-206	-50	-48	-151	-184	-293	-323	
Δ%	Ref.	-1	5	-25	-1%	-12%	-8%	-9%	-17%	-23%	-20%	-24%	-6%	-5%	-17%	-21%	-33%	-37%	
D%	6,9	9,2	8,7	26,3	16,2	24,6	10,2	12,6	17,9	22,2	22	29,2	14,7	18,9	19,4	22,1	34,3	38,6	
	D% average				20,4		11,4		20,1		25,6		16,8		20,8		36,5		
Models and drought (ranking) by D%					4		7		5		2		6		3		1		

Vulnérabilité : détermination des seuils de D%

Seuil des principales essences selon un type référence

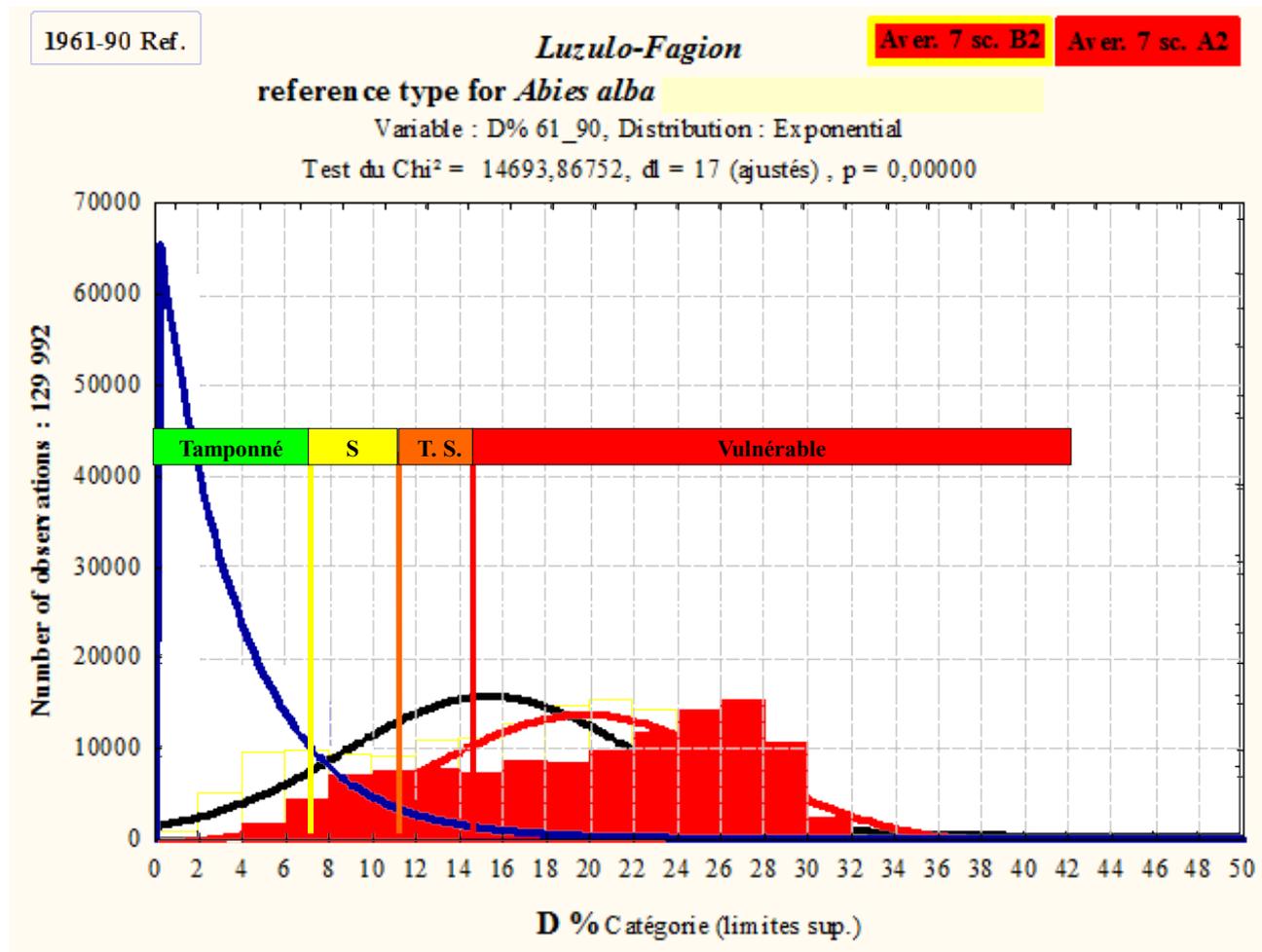
exemple pour : *Fagus sylvatica*



Vulnérabilité : détermination des seuils de D%

Seuil des principales essences selon un type référence

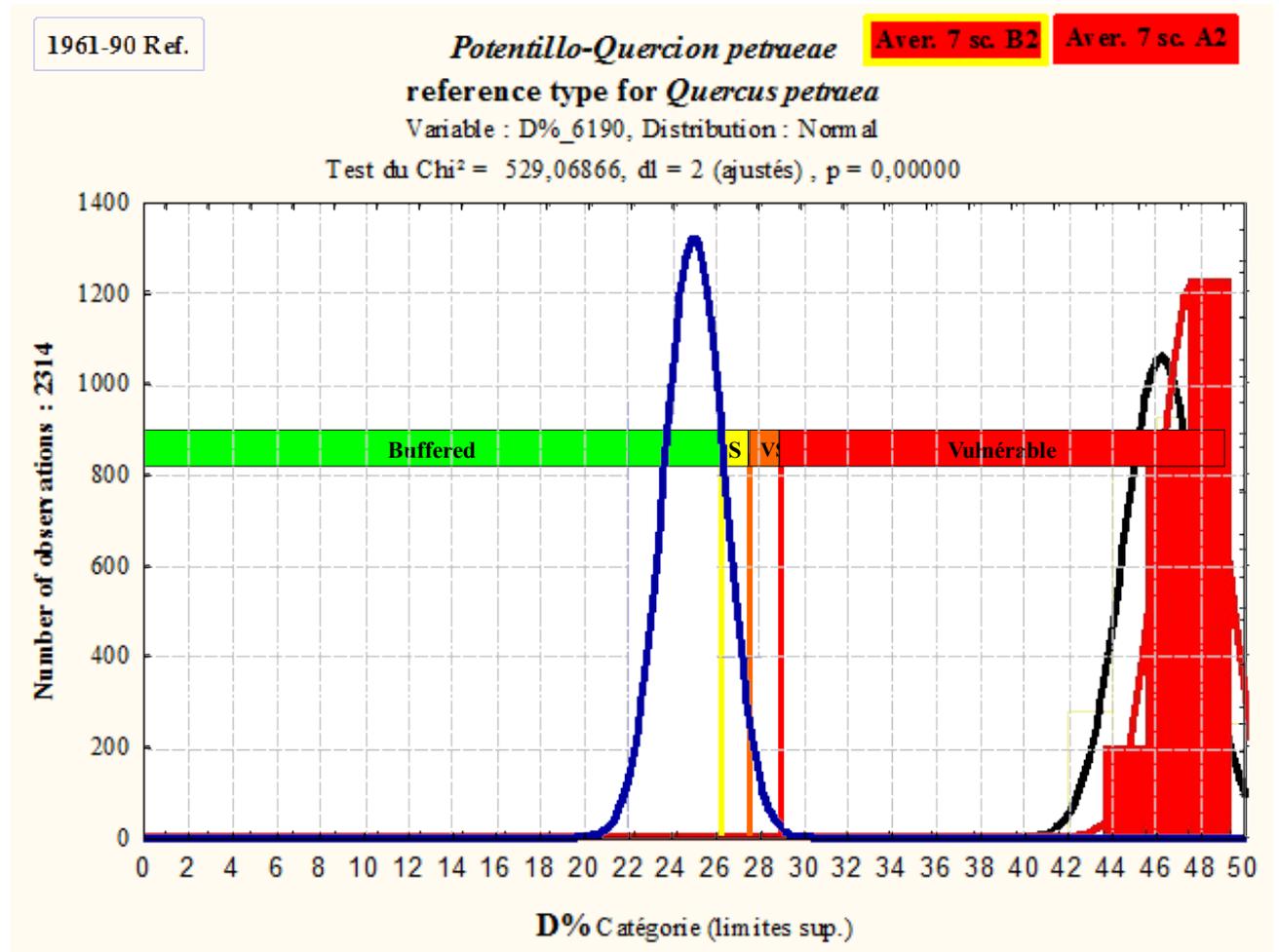
exemple pour :
Abies alba



Vulnérabilité : détermination des seuils de D%

Seuil des principales essences selon un type référence

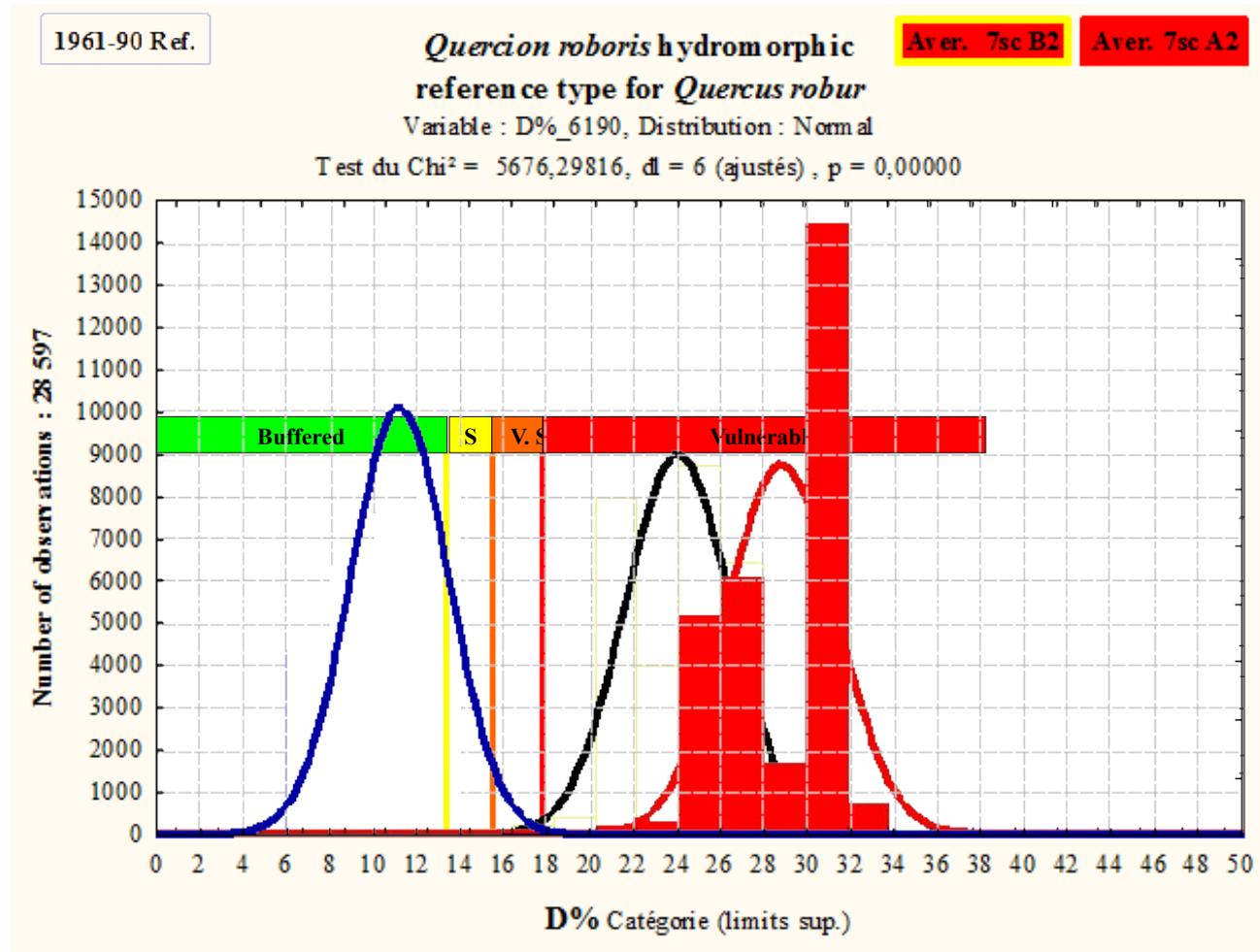
exemple pour : *Quercus petraea*



Vulnérabilité : détermination des seuils de D%

Seuil des principales essences selon un type référence

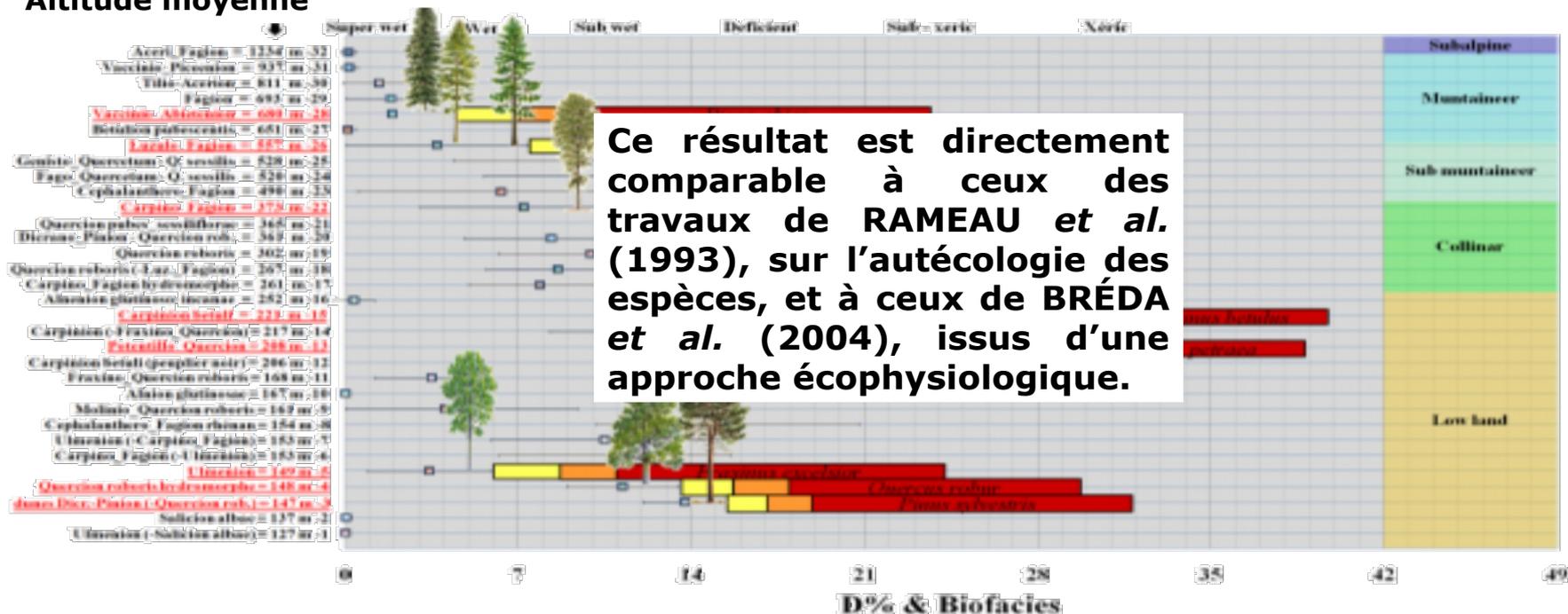
exemple pour : *Quercus robur*



Classement des principales essences selon l'altitude et le D%

Synthèse de l'altitude moyenne et du D% moyen des 32 types fonctionnels d'Alsace calculés sur 757 896 polygones à partir de la référence standard Aurehly 1961_1990 : seuils de vulnérabilité des principales espèces de la dendroflore locale

Altitude moyenne



Ce résultat est directement comparable à ceux des travaux de RAMEAU *et al.* (1993), sur l'autécologie des espèces, et à ceux de BRÉDA *et al.* (2004), issus d'une approche écophysiological.

Betula pubescens > *Alnus glutinosa* > *Picea abies* > *Fraxinus excelsior* > *Abies alba* > *Betula pendula* > *Quercus robur* > *Fagus sylvatica* > *Pinus sylvestris* > *Acer pseudoplatanus* > *Carpinus betulus* > *Quercus petraea*.

Validation des résultats sur le Chêne pédonculé dans la forêt de la Harth (15 000 ha)

La Harth est une FD dans le sud de l'Alsace sous tonalité subcontinentale marquée.

Elle est structurée par une Chênaie-Charmaie qui constitue le *Carpinion*.

A partir de 1991 un dépérissement important a été observé principalement sur chêne pédonculé. Sur la période 1991-1999 près de 40 000 m³ ont été récoltés, essentiellement des chênes

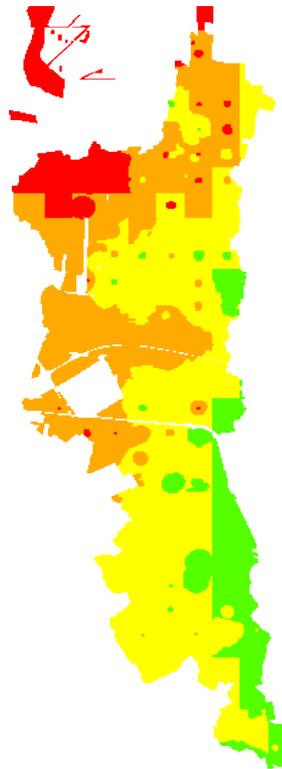


Carte de vulnérabilité du Chêne pédonculé (*Quercus robur*)

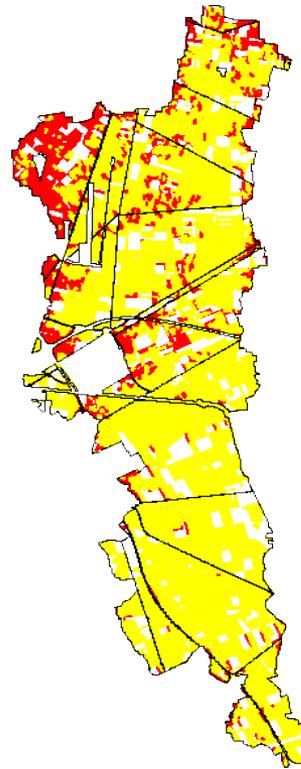
Il apparaît que la relation entre la prédiction de vulnérabilité et l'observation du dépérissement est très significative ($p < 0.00$) avec $r^2 = 0.48$ calculé sur 62 357 polygones.

Potentiellement toutes les zones sèches sont classées très sensibles à vulnérables

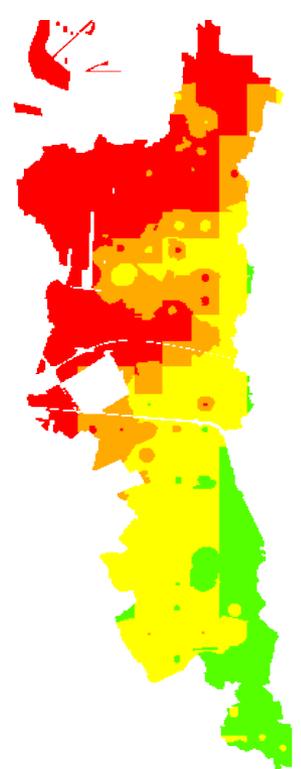
Réf. Aurehly
1961_1990



Notation du dépérissement de
Q. robur constaté en 1994 par :
1/photointerprétation 2/transects



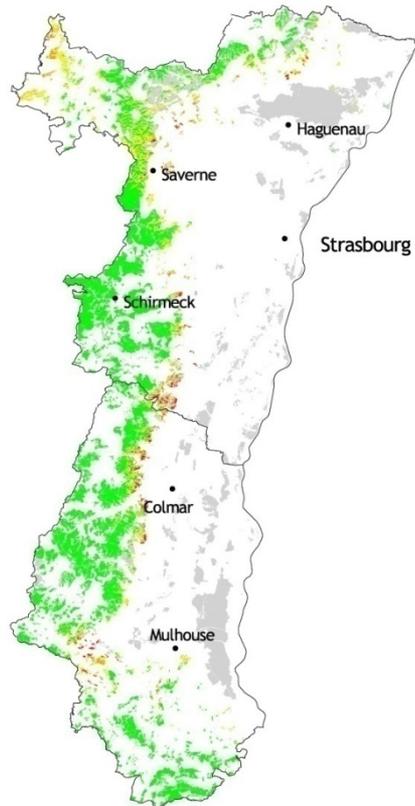
Aurehly
1971_2000



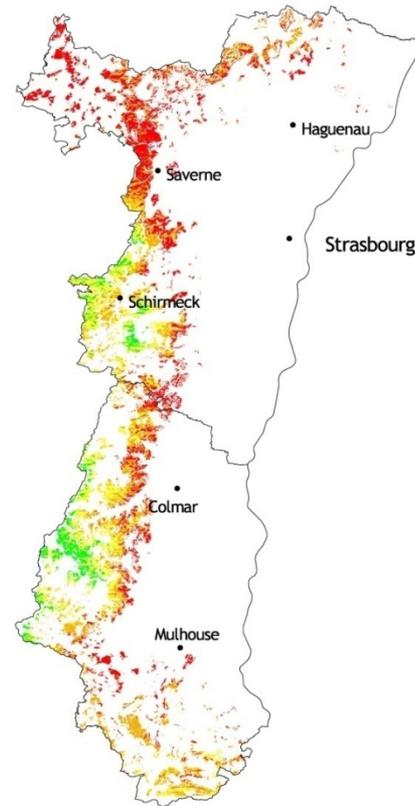
Résultats : cartes de vulnérabilité (type Sapin)

Mixage de tous les scénarios B2 et A2 de chaque modèle

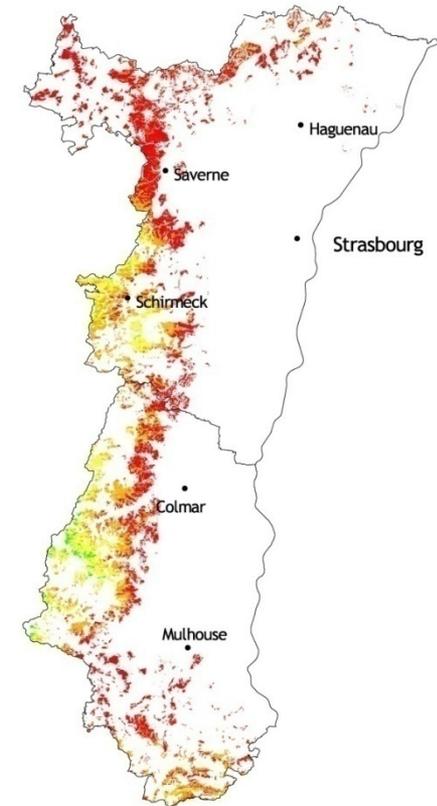
Référence
61-1990



« B2 »



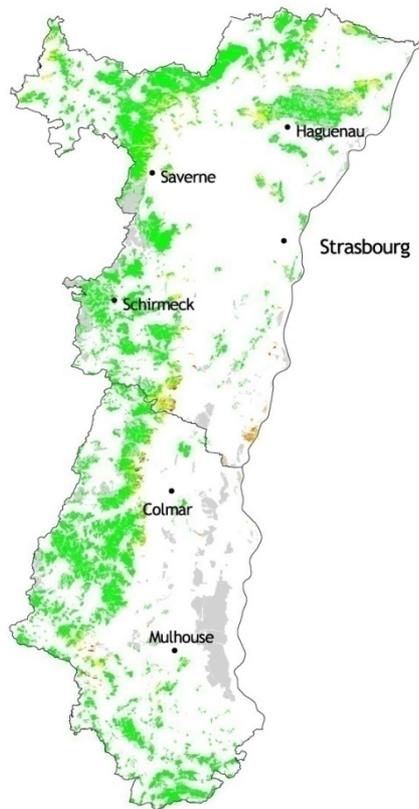
A2



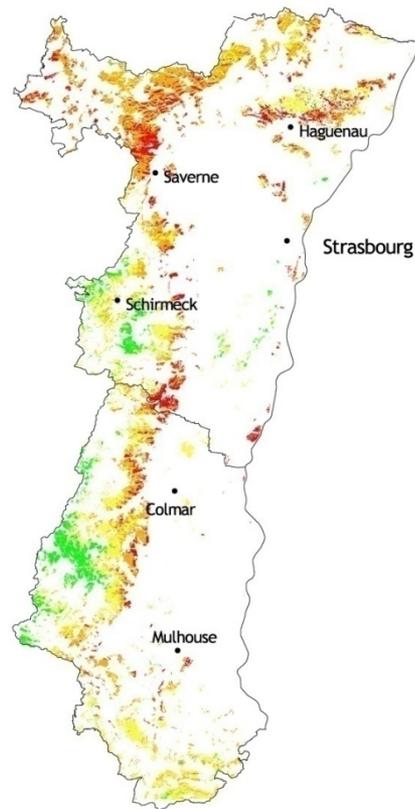
Résultats : cartes de vulnérabilité (type Hêtre)

Mixage de tous les scénarios B2 et A2 de chaque modèle

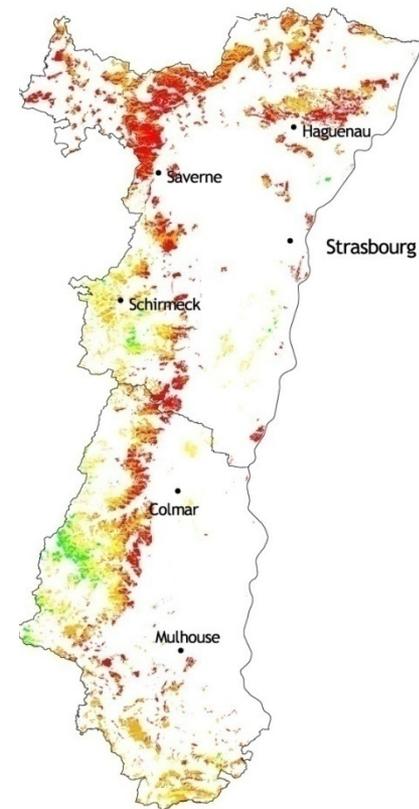
Référence
61-1990



« B2 »



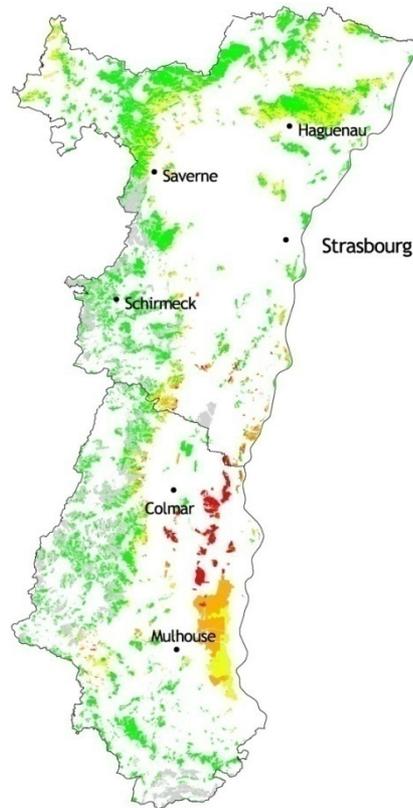
A2



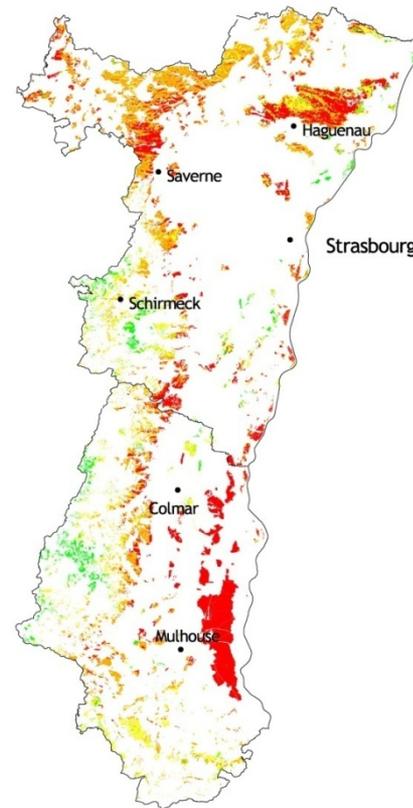
Résultats : cartes de vulnérabilité (type Chêne pédonculé)

Mixage de tous les scénarios B2 et A2 de chaque modèle

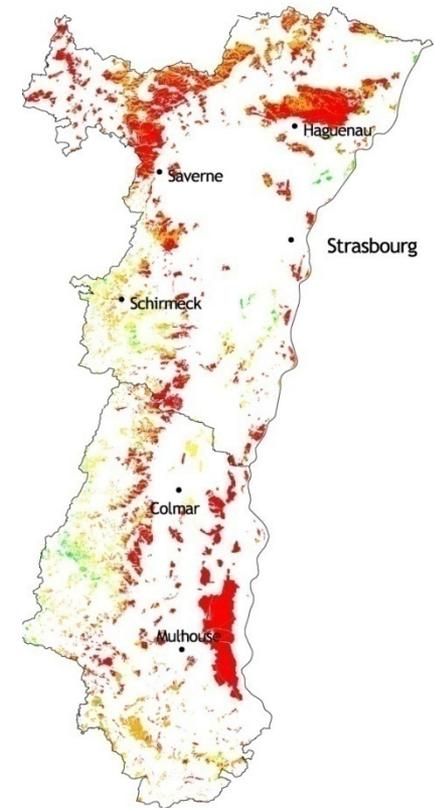
Référence
61-1990



« B2 »



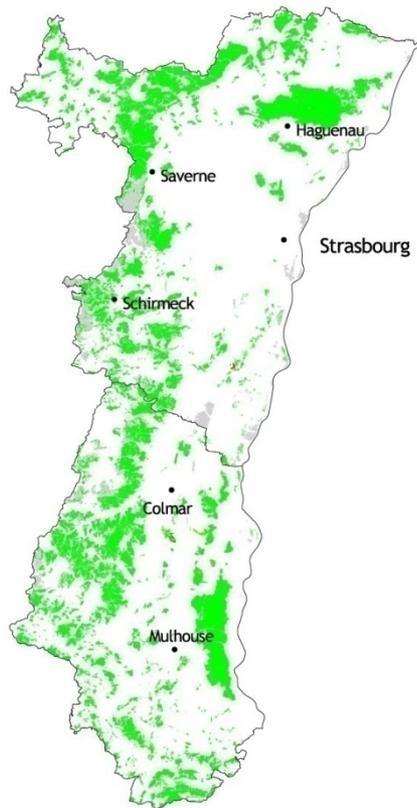
A2



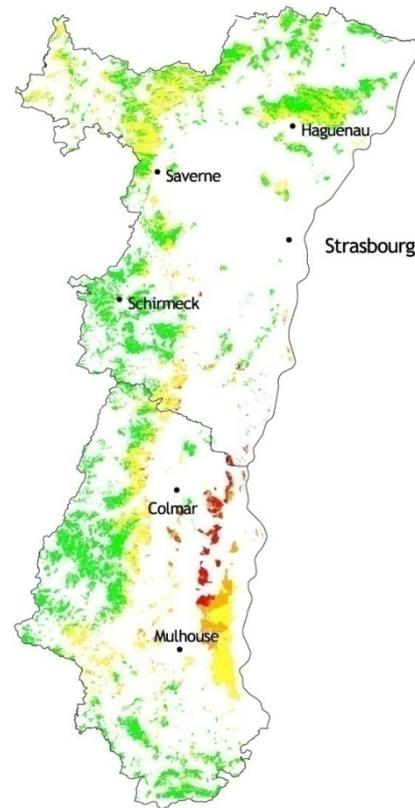
Résultats : cartes de vulnérabilité (type Chêne sessile)

Mixage de
tous les
scénarios
B2 et A2 de
chaque
modèle

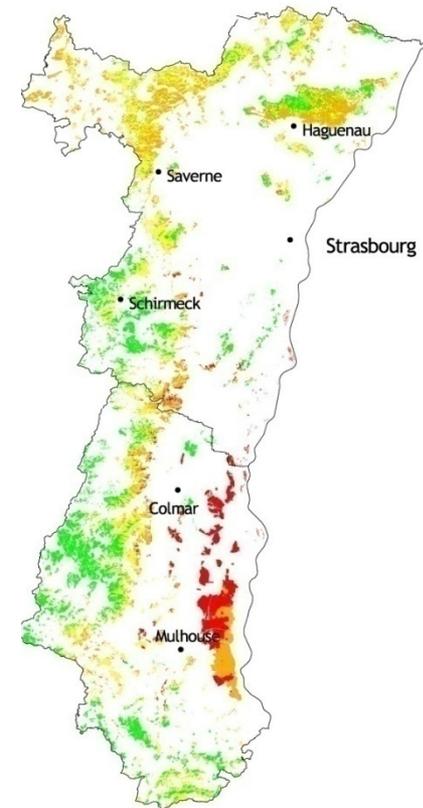
Référence
61-1990



« B2 »

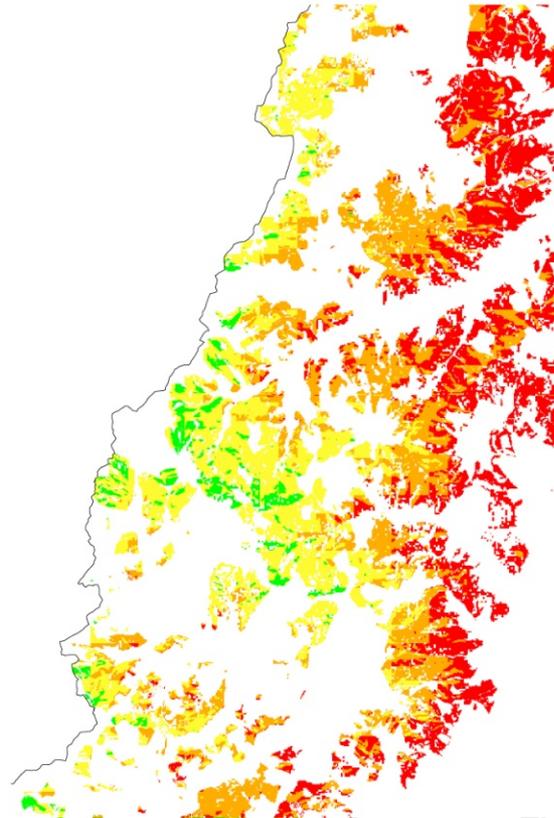


A2



Résultats : zoom Htes-Vosges, cartes de vulnérabilité du Sapin

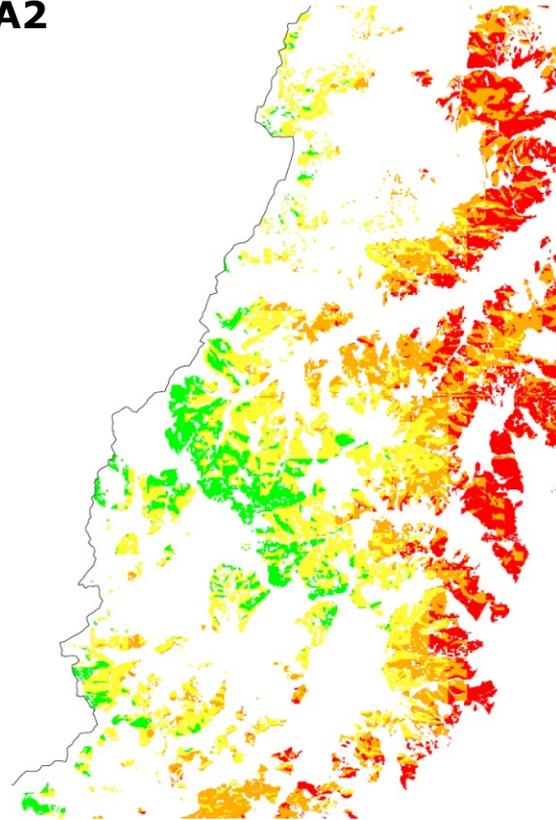
1961-1990



Résultats : zoom Htes-Vosges, carte de vulnérabilité du Hêtre

Référence 61-1990

A2



Discussion : Limites de la méthode

- **Relativité du diagnostic stationnel,**
- **Incertitude sur la pluviométrie et la RU,**
- **Non prise en compte de la variabilité de la RU au sein de chaque type fonctionnel et des tassements de sol qui réduisent la RU,**
- **Choix de la formule de calcul de l'ETP,**
- **Pertinence de la formule du D⁰%,**
- **Validité des scénarios du GIECC, Choix du modèle et du scénario à retenir,**
- **Importance de la diversité génétique (plasticité et adaptation >>> homéostasie, résilience)**

La compétition inter et intraspécifique reste le moteur principal de la sylvogenèse qui s'exerce dans un contexte stationnel donné

Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Merci pour votre attention

Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Vulnérabilité : Identification des seuils de D%

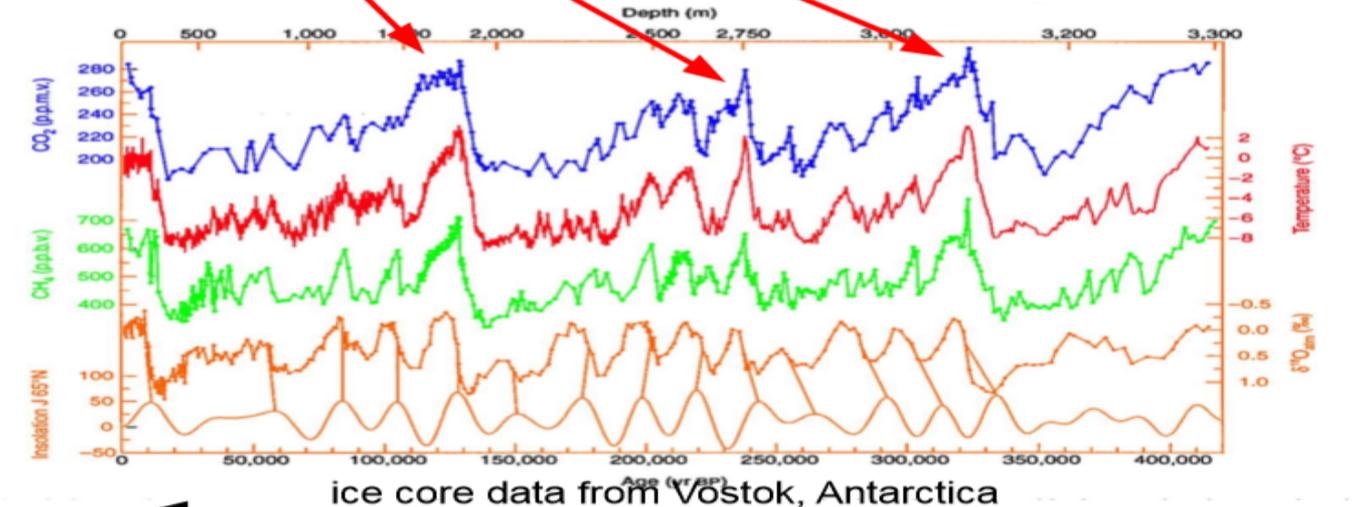
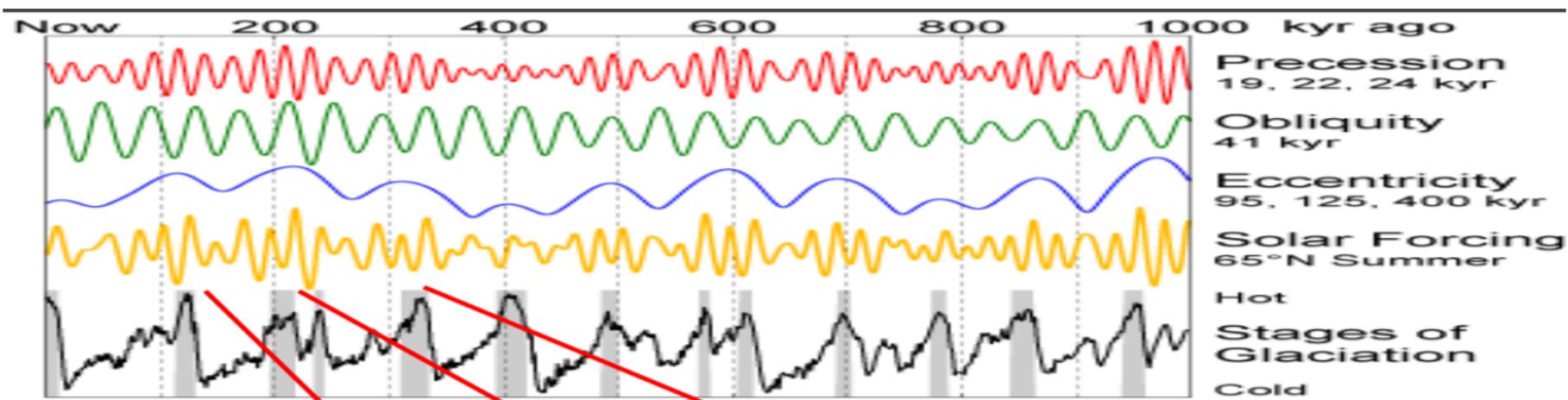
Valeurs seuils des principales essences calculées selon la période de référence 1961-1990

Choix d'un type fonctionnel de référence : exemple pour le Hêtre

Seuil essence 61_1990	N° type	Types fonctionnels + altitude moyenne en rouge type référence seuils	Nbre poly	D%_pv Moyenne	D% IC -95%	D% IC +95%	D%_pv Ec-Type	Tamponné	Sensible	Très Sensible	Vulnérable	D%_pv Maxi	SAPIN	EPICEA	DOUGLAS	HÊTRE	FRÈNE	CHÊNE PED.	CHARME	CHÊNE SES.	PIN SYLV.	BOUL. VER.	SYCPMORE	AULNE GL.	
								Moyenne +2 Ec-Type	Moyenne +3 Ec-Type	Moyenne +3 Ec-Type	>														
	1	Ulménion (-Salicion albae) -127	248	0,0	0,00	0,03	0,1	0,1	0,2	0,3	>0,3	1					X	X						Z	
	2	Salicion albae -137	264	0,0	0,02	0,07	0,2	0,2	0,4	0,6	>0,6	1												Z	
PIN SYLV.>	3	dunes Dicr.-Pinion (- Querc. rob.) -147	50	13,7	13,58	13,88	1,7	15,4	17,1	18,8	>18,8	18						Y				X	Y		
CHÊNE PEDONC.	4	Quercion roboris hydromorphe -148	28598	11,2	11,19	11,24	2,3	13,5	15,7	18,0	>18	17		P				X		X	X		Y	Z	
FRENE >	5	Ulménion -149	3697	3,4	3,32	3,48	2,5	5,9	8,4	10,8	>10,8	9						X						Z	
SYCOMORE >	6	Carpino_Fagion (-Ulménion) -153	3667	10,9	10,76	11,07	4,7	15,6	20,2	24,9	>24,9	19		P				X	Y					X	
	7	Ulménion (- Carpino Fag.) -153	5726	10,5	10,37	10,61	4,6	15,1	19,7	24,3	>24,3	19		P				X	Y					Y	
	8	Cephalanthero_Fagi. rhénan -154	1682	15,5	15,22	15,73	5,3	20,8	26,1	31,4	>31,4	25						X	Z	Z	Z		Y		
	9	Molinio_Quercion rob. -161	1296	4,0	3,73	4,32	5,35	9,4	14,7	20,1	>20,1	19		P				Z		X		Y	X	Y	
AULNE >	10	Alnion glutinosae -167	615	0,0	0,01	0,03	0,13	0,1	0,3	0,4	>0,4	1												X	
	11	Fraxino_Quercion rob. -168	34861	3,5	3,47	3,52	2,32	5,8	8,1	10,4	>10,4	20		P				Z	X	X	X	Z		Y	Y
CHENE SES. >	12	Carpinion (Populus nig.) -206	28	22,1	21,47	22,74	1,64	23,7	25,4	27,0	>27	26						Z	Y	Z			Y	Y	
	13	Potentillo_Quercion -208	2314	25,0	24,93	25,04	1,39	26,4	27,8	29,2	>29,2	28						Z	Z	X					
CHARME >	14	Carpinion (-Frax. Querc.) -217	6950	13,5	13,39	13,63	5,23	18,7	24,0	29,2	>29,2	22		P				Y	Y	X	Y		Y	Z	
	15	Carpinion -221	79461	17,7	17,65	17,70	4,31	22,0	26,3	30,6	>30,6	35		P	P				Z	X	X	Z			
	16	Alnion glutinoso-incanae -252	16547	0,4	0,35	0,37	0,81	1,2	2,0	2,8	>2,8	4		P	P				X	Y	Y		Y	X	
	17	Carpino_Fagion hydrom. -261	1392	7,9	7,73	8,01	2,65	10,5	13,2	15,8	>15,8	17						X	Y	X	X		Y	Z	
	18	Quercion rob. (- Luz. Fagion) -267	35128	8,6	8,58	8,64	2,89	11,5	14,4	17,3	>17,3	18		P	P				X	X	X	X			
BOUL. VER..>	19	Quercion roboris -302	50476	9,9	9,89	9,96	3,76	13,7	17,4	21,2	>21,2	27		P	P				X	X	X	X		Z	
	20	Dicrano_Pinion - Quercion rob. -361	7618	8,3	8,27	8,42	3,54	11,9	15,4	19,0	>19	22		P	P				Y	Y	X	X			
	21	Quercion pubes. petraea -365	248	20,4	19,77	21,10	6,25	26,8	32,1	38,5	>38,5	23							Z	Z	Z	Z			
HETRE >	22	Carpino_Fagion -373	159730	7,2	7,21	7,25	4,18	11,4	15,6	19,8	>19,8	29	Z	P	P		X	Y	Y	X	X	Y	Y	Y	
	23	Cephalanthero_Fagion -490	3075	6,3	6,10	6,51	5,80	12,1	17,9	23,7	>23,7	32	P	P	P		X		Z	Z	Y	Y	Y	Z	
	24	Fago_Quercetum - Quercetum ses. -520	2646	13,6	13,31	13,92	8,01	21,6	29,6	37,7	>37,7	30	Z	P	P	Z			Z		X	Y	Y		
SAPIN, DOUGLAS>	25	Genisto_Quercetum - Q. sessilis. -528	3813	9,8	9,58	9,93	5,41	15,2	20,6	26,0	>26	28	Z	P	P					X	Y	Y	Z		
	26	Luzulo_Fagion -557	130155	3,7	3,70	3,74	3,67	7,4	11,0	14,7	>14,7	23	X	P	P				Z		Y	Y	Y	Z	
	27	Betulion pubescentis -651	124	0,1	0,05	0,16	0,31	0,4	0,7	1,0	>1	1		X							X	X		Y	
EPICEA>	28	Vaccinio_Abietenion -680	68383	1,9	1,89	1,93	2,67	4,6	7,2	9,9	>10,6	21	X	X	P	Y					X	X			
	29	Fagion -693	105572	1,8	1,83	1,87	2,67	4,5	7,2	9,9	>9,9	19	X	P	P	X	Y				Y	Y	Z	Y	
	30	Tilio-Acerion -811	2204	1,4	1,26	1,49	2,68	4,1	6,7	9,4	>9,4	24												X	
	31	Vaccinio_Piceenion -937	99	0,2	0,08	0,22	0,36	0,5	0,9	1,2	>1,2	1	X	X	P	Y						Y			
	32	Aceri_Fagion -1234	678	0,1	0,11	0,16	0,34	0,5	0,8	1,2	>1,2	1	Z											X	

Comportement dynamique des essences selon chaque type : Rouge ess. Structurante; Noir ess. accomp. ; Gris ess. erratique

Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique



Glacial epochs & Milankovitch cycles

prove that there are several natural GHG feedback mechanisms!

Scafetta, EPA 2009

Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Calage des datations du massif du Honeck au cours de l'Holocène avec les paramètres climatiques et anthropiques (GOEPP 2007)

Recolonisation post-glaciaire

Atlantique :

Phase xérothermique

= Optimum postglaciaire :

$t^{\circ} > 2$ à 3° à

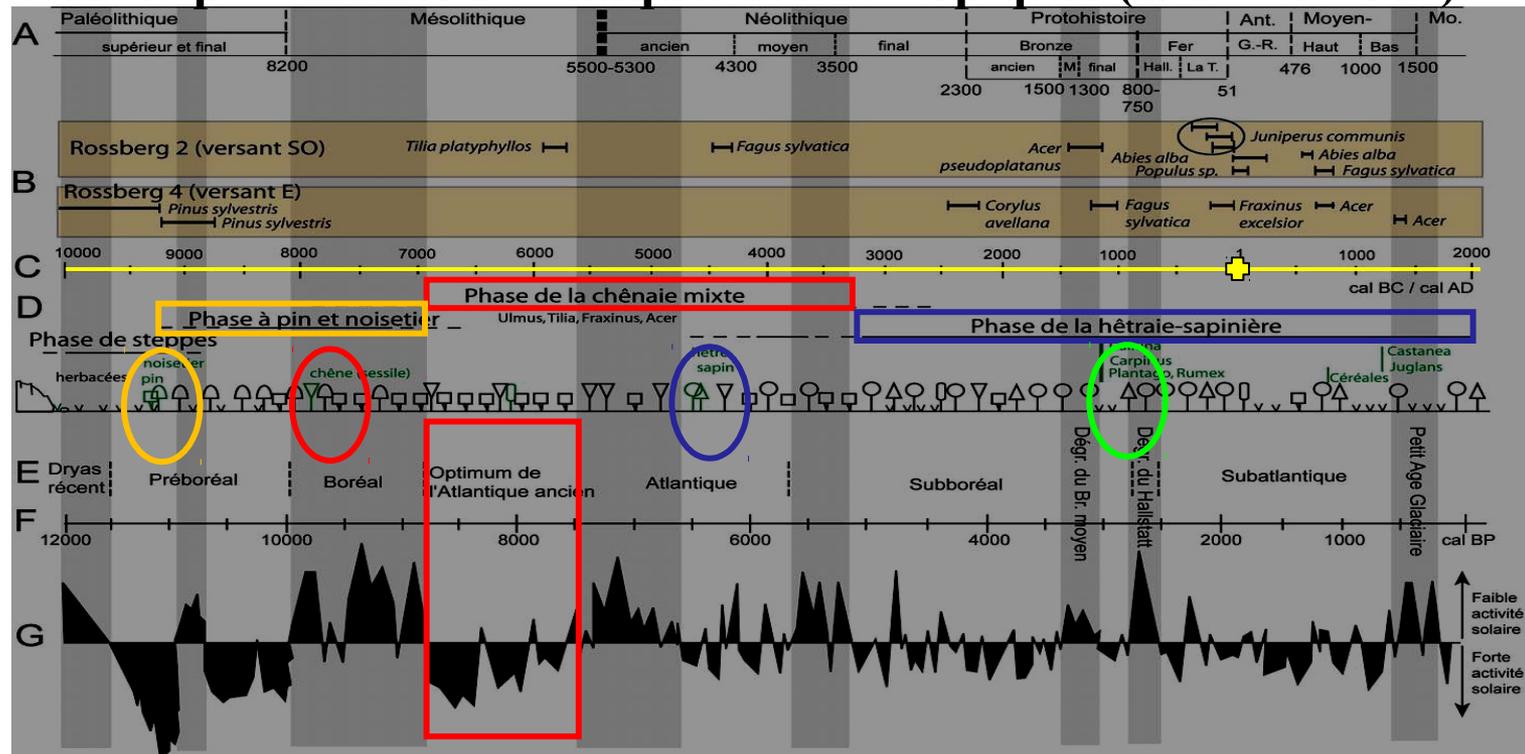
aujourd'hui.

La chênaie montait sur les plus hauts sommets vosgiens.

Phase mésohygrothermique

=

+ froide + humide
arrivée des dryades
les post pionnières
sont marginalisées



A: archaeological and historical periods (MAUVILLY 1991; JEUNESSE 1991)

B: datations of soil charcoal

C: Chronology in ages cal BC/cal AD

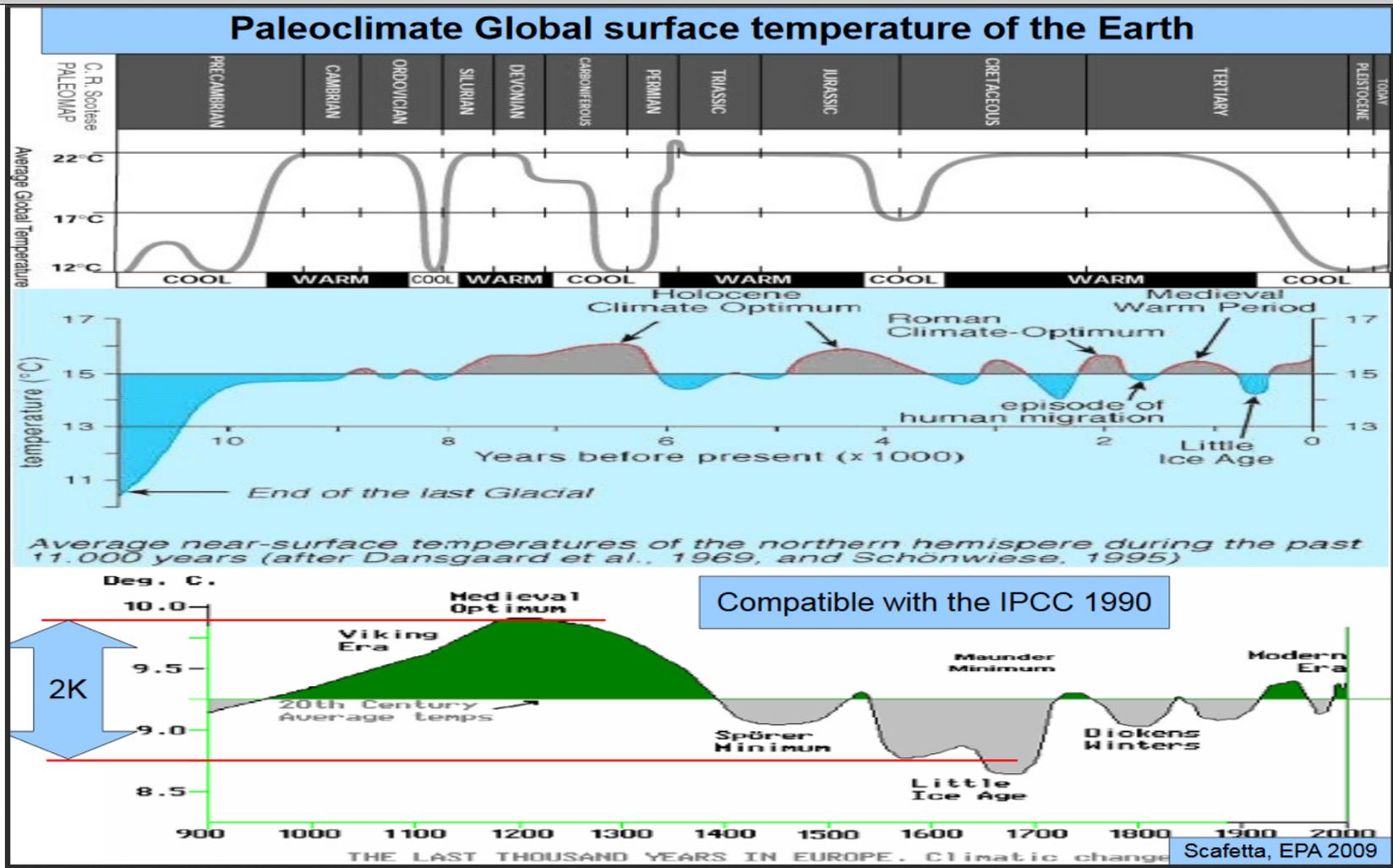
D: Evolutions of the vegetation and the first appearances of species (green symbols with their name) using the palynologic diagrams of the Altenweiher lake (926 m) and peat from the Moselotte source (DE VALK 1981)

E: Main chronozones

F: Chronological scale in cal BP (= Before Methodnt = 1950)

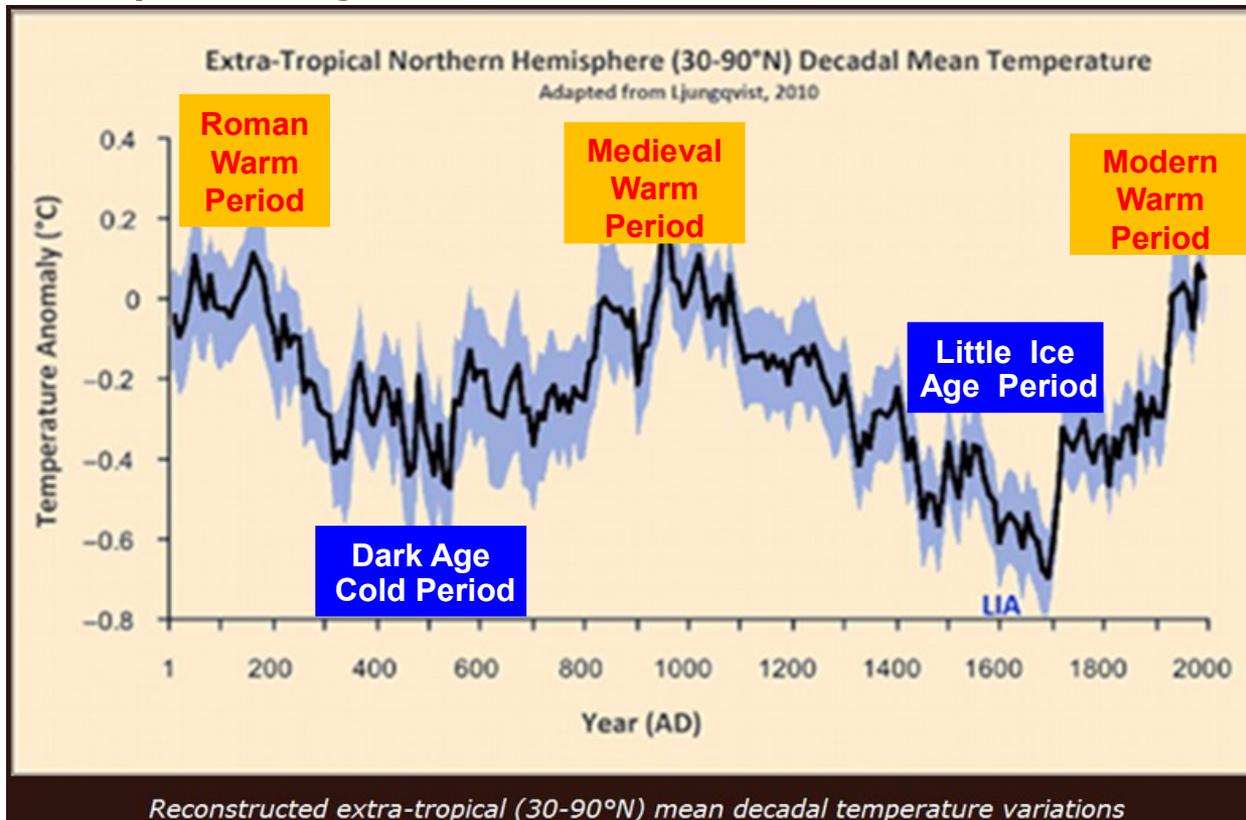
G: Variations of residual C^{14} (according to STUIVER et al. 1993); in grey, cooling down periods

Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique



Réchauffement global : Identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique

Une nouvelle reconstruction de température à résolution décennale, couvrant les deux derniers millénaires, est présentée pour l'hémisphère nord extratropical (90-30 ° N), en utilisant de nombreux enregistrements proxy de paléo-température jamais inclus auparavant dans une reconstruction de température à grande échelle.



LJUNGQVIST Fredrik Charpentier , 2010.- A NEW RECONSTRUCTION OF TEMPERATURE VARIABILITY IN THE EXTRA-TROPICAL NORTHERN HEMISPHERE DURING THE LAST TWO MILLENNIA. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, Vol. **92**: 339-351